

L'Equateur et les Pôles du Système Solaire

L'équateur et les pôles de la Terre sont des notions familières, bien matérialisées par les globes terrestres. La trace sur la sphère céleste du plan équatorial, et celle de l'axe des pôles, sont faciles à visualiser. Dans sa rotation, le Soleil a de même son équateur et ses pôles; chaque planète aussi.

Mais si on mélange le tout? Pour un ensemble déformable, aussi divers et changeant que l'est le système solaire, ces expressions ont-elles un sens?

Non seulement elles sont justifiées, mais dans l'extrême complexité des mouvements relatifs de tous ses composants, le seul îlot de simplicité, et d'invariabilité, réside dans l'équateur du système solaire, et dans la ligne de ses pôles qui lui est orthogonale.

Jupiter seul face au Soleil

Si le cortège planétaire du Soleil se réduisait à son élément le plus important - Jupiter - tout serait à la fois simple et immuable. Les deux astres tourneraient autour de leur centre d'inertie commun. La masse du Soleil valant 1047 fois celle de Jupiter, et leur distance valant 1118 fois le rayon r_{\odot} du Soleil, le centre d'inertie serait - de justesse - à l'extérieur du Soleil, juste au dessus de la photosphère. Comme les autres étoiles sont beaucoup trop loin pour perturber le couple (Jupiter est distant du Soleil de moins de 3/4 d'heure de lumière; les étoiles, de plus de 4 années), les centres des deux astres tourneraient dans un plan unique et invariable, qui serait l'équateur de ce système solaire fort appauvri. La normale à ce plan

issue du centre O d'inertie serait l'axe de révolution du couple; il percerait la sphère céleste en deux points, l'un au nord dans la constellation du Dragon, l'autre au sud dans celle de la Dorade, et ces pôles ne varieraient pas.

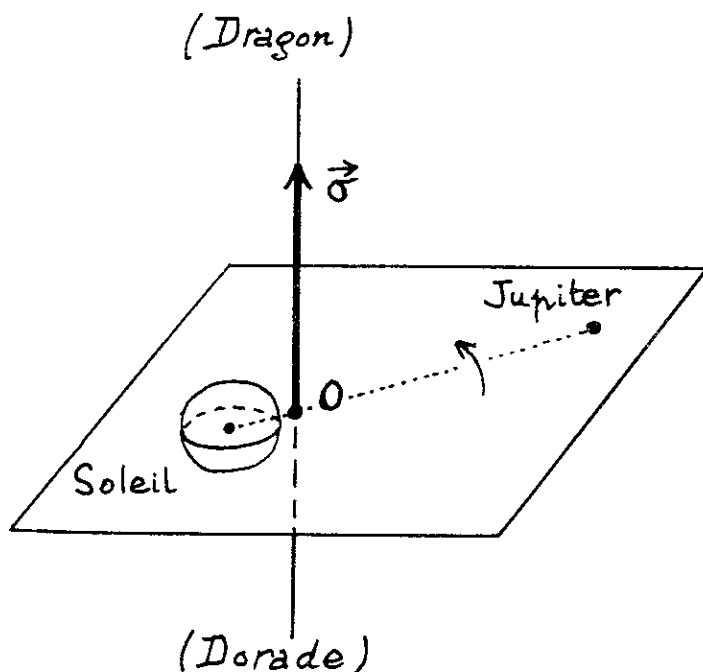


fig. 1

Le mouvement obéirait naturellement aux lois rappelées par M. Hubert Gié dans son excellent panorama du " moment cinétique à travers l'univers" (Cahier Clairaut de décembre 1987, n°39, p.9): les deux astres décriraient des ellipses de foyer commun O, les rayons vecteurs \vec{OS} et \vec{OJ} balayant des aires proportionnelles aux temps. Les quantités de mouvement

$$m_{\odot} \vec{v}_{\odot} \quad \text{et} \quad m_j \vec{v}_j$$

sans cesse variables, auraient des moments

$$\vec{OS} \wedge m_{\odot} \vec{v}_{\odot} = \vec{\sigma}_{\odot} \quad \text{et} \quad \vec{OJ} \wedge m_j \vec{v}_j = \vec{\sigma}_j$$

dont la somme, en l'absence d'actions extérieures, resterait constante (théorème du moment cinétique). Cette somme

$$\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_{\odot} + \vec{\sigma}_j$$

serait un vecteur fixe, porté par l'axe et pointant le Dragon. Les distances et les vitesses resteraient toujours dans le même rapport que les masses; mais le Soleil n'ayant pour lui qu'un seul de ces trois facteurs, et Jupiter les deux autres, les contributions à σ seraient dans le rapport inverse des masses, et le Soleil posséderait donc moins du millième du moment cinétique global.

Avec en plus Saturne... et les autres

Que reste-t-il de cette simplicité képlérienne lorsque nous réintroduisons les autres planètes? La seule entrée en scène de Saturne, troisième corps dans la hiérarchie des masses, engendre déjà bien des complications. Les deux planètes orbitent dans des plans voisins, mais distincts (qui font un angle de plus de 1°). A une époque donnée, on peut encore regarder leurs trajectoires comme des ellipses, mais des ellipses qui se déforment lentement, à cause de leur attraction mutuelle. Quant à la trajectoire du Soleil autour du centre d'inertie, on

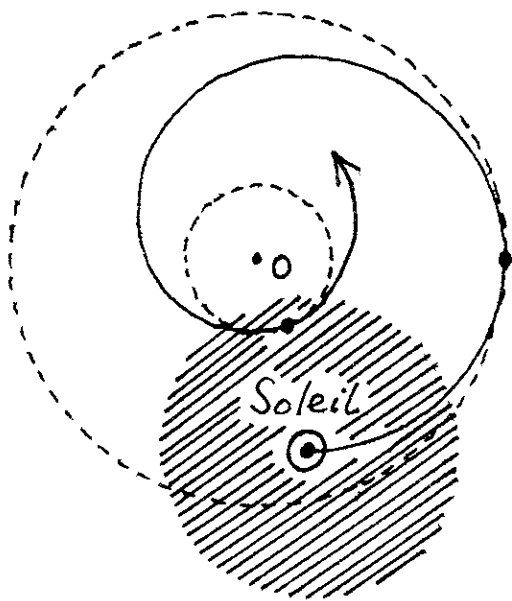


fig. 2

peut voir qu'elle n'a plus grand'chose de commun avec une ellipse. En effet, lorsque les trois astres sont alignés, le centre d'inertie, qui est toujours du côté de Jupiter, se trouve à $0,48 r_\odot$ du centre du Soleil si les deux planètes sont de part et d'autre, et à $1,65 r_\odot$ du centre du Soleil si elles sont d'un même côté.

Chacune de ces configurations se reproduit tous les 20 ans environ, après que Jupiter ait tourné de 1,68 tour et Saturne de 0,68 tour. L'orbite du Soleil autour de O comprend donc des points sur chacun des deux cercles concentriques de rayons $0,48$ et $1,65 r_\odot$; ces points sont alternativement sur le grand et sur le petit cercle, avec chaque fois un écartement angulaire de $1,68/2 = 0,84$ tour $\# 300^\circ$. La trajectoire solaire remplit d'entrelacs la couronne comprise entre

les deux cercles, avec en outre de petites oscillations perpendiculairement au plan de la fig. 2, puisque les deux planètes circulent dans des plans différents. Quant au vecteur moment cinétique total

$$\vec{\sigma} = \vec{\sigma}_\odot + \vec{\sigma}_j + \vec{\sigma}_s$$

il reste invariable en grandeur et en direction; la seule différence avec le cas précédent est que ses composants ne seront plus colinéaires (fig. 3).

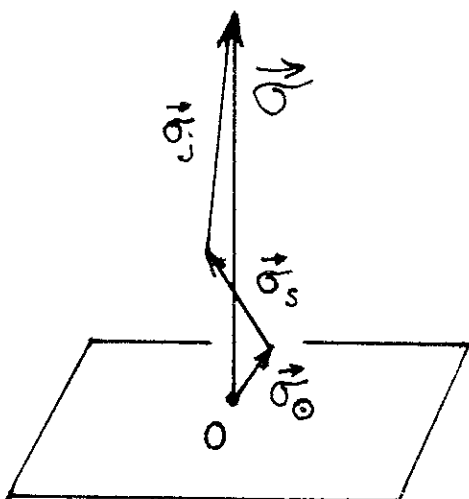


fig. 3

Il en va naturellement de même quand on tient compte de toutes les planètes: la résultante $\vec{\sigma}$ des moments cinétiques, qui varient tous, reste constante, et définit l'équateur et les pôles du système solaire. La simplicité de ce résultat contraste immensément avec la complexité des mouvements individuels, dont tous les éléments évoluent: Les plans des orbites qui basculent lentement, ainsi que les excentricités, les périhélies, et, dans une moindre mesure, les

demi-grands-axes et les périodes de révolution.

La rotation du Soleil

Je n'ai tenu compte jusqu'ici que des moments cinétiques orbitaux, comme si les astres ne tournaient pas sur eux-mêmes. Or, dès le début de son article, M. Gié introduit le moment cinétique propre ou de rotation, et montre que le vecteur $\vec{\sigma}$ qui reste invariant dans un système isolé est la somme de tous les moments cinétiques, y compris ceux de rotation.

Oublier la rotation du Soleil dans une théorie sur les moments cinétiques de son système est une mésaventure dont les meilleurs esprits ne sont pas à l'abri, puisqu'elle n'épargna pas Pierre-Simon Laplace, dans sa " Mécanique Céleste ", publiée de 1799 à 1825. Ce fut Louis Poinsoot qui s'en avisa, et qui rectifia l'omission en 1834 dans sa " Théorie et détermination de l'équateur du système solaire ". Le terme oublié par Laplace est d'ailleurs moindre que ne le croyait Poinsoot, car on estime maintenant que, par suite de la répartition interne de sa masse, le Soleil n'aurait pour moment cinétique rotatoire que 16% de celui d'une sphère homogène. Quoi qu'il en soit, si les moments cinétiques de rotation des planètes sont entièrement négligeables, celui du Soleil dépasse les moments orbitaux de plusieurs planètes.

Recensement et cartographie des moments cinétiques

Le tableau ci-contre rassemble les moments cinétiques qui excèdent $10^{47} \text{ g cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Moments cinétiques (en $10^{47} \text{ g cm}^2 \text{ s}^{-1}$)

| | |
|------------------------------|-------|
| <u>-orbitaux:</u> | |
| Soleil | ≈ 3 |
| Vénus | 1,8 |
| Terre | 2,7 |
| Jupiter | 1930 |
| Saturne | 781 |
| Uranus | 170 |
| Neptune | 252 |
| (somme de tous les autres) | ≈ 0,6 |
| <u>-de rotation:</u> | |
| Soleil | 16,5 |

Il ne diffère du cours de Mécanique de Berkeley, sur lequel s'appuie M. Gié, qu'à propos de la rotation solaire, ainsi que de Pluton - dont la masse, autrefois égalée à celle de la Terre, est reconnue 500 fois plus faible depuis la découverte de son satellite Charon.

La prépondérance des quatre grosses planètes est donc très forte. Si on reporte sur une carte du ciel les pôles actuels de leurs orbites - soit J,S,U,N - le barycentre

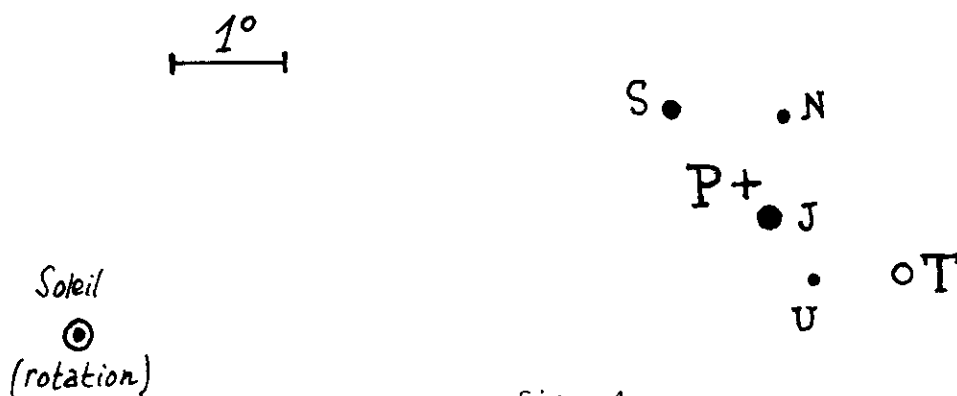


fig. 4

de ces points, affectés des moments cinétiques respectifs, sera donc très proche du " pôle " P du système solaire. Le pôle de rotation du Soleil, qui est loin de la concentration J-S-U-N, déplace vers lui le pôle P d'environ 2', par rapport au barycentre des quatre points. La Terre, et les autres planètes, n'agissent sur la position de P que d'un tout petit nombre de " d'arc.

Tous les points de la fig. 4 se déplacent avec le temps, sauf P qui reste fixe par rapport aux étoiles. En particulier, T qui est le pôle de l'orbite terrestre, ou pôle de l'écliptique, perd chaque siècle 0,2% de sa distance angulaire à P, qui vaut actuellement 1°37'. Il y a une petite migration parmi les étoiles du pôle de l'orbite de la Terre, qui est seulement 20 fois plus lente que la migration de son pôle de rotation (la précession des équinoxes, qui nous privera bientôt de notre étoile polaire).

La position de l'axe de rotation solaire, à 6° de la concentration J-S-U-N (entièrement contenue dans un cercle de 1° de rayon) a de quoi surprendre. Celle de T également, car les pôles orbitaux des 3 planètes telluriques non représentées sur la fig. 4 (Mercure, Vénus, Mars) sont plutôt du côté de l'axe de rotation solaire. Si l'on excepte Pluton - marginale à tant d'égards - la Terre est la seule planète dont l'axe de l'orbite fasse avec l'axe de rotation du Soleil un angle de plus de 7°.

Le nuage zodiacal

L'espace interplanétaire est occupé par un nuage de grains solides ayant en moyenne 1/100 de mm. de diamètre. Ce nuage est aplati en forme de lentille et il dépasse largement l'orbite de Mars, au moins. Ces grains brillent au soleil, et rendent un peu plus lumineuse que le reste du ciel une " bande zodiacale " ayant à peu près l'écliptique pour ligne médiane.

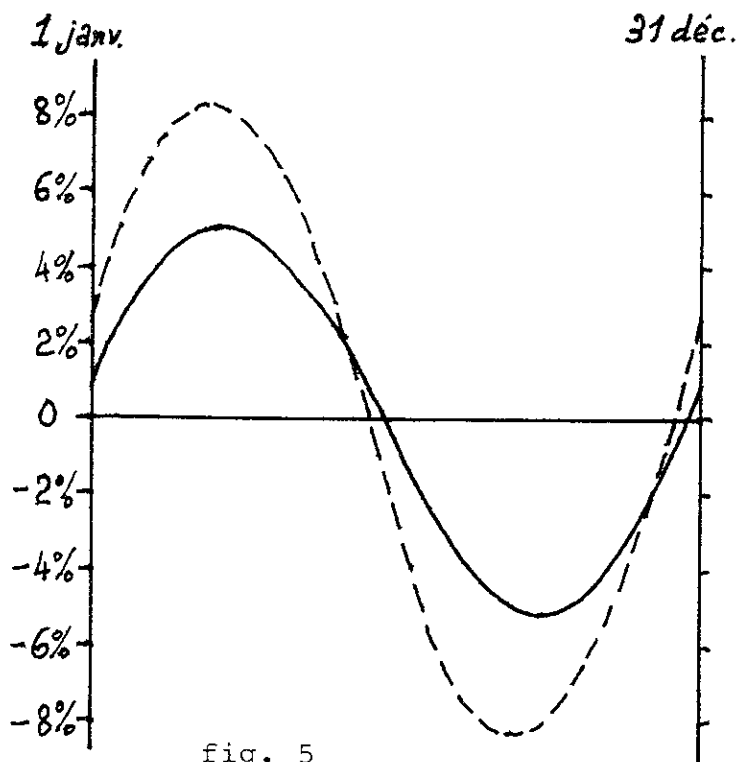


fig. 5

Variation annuelle de la brillance du ciel vers le pôle nord de l'écliptique; — dans le visible (satellite D2A, 1978); --- dans l'infra-rouge à 25 μm (satellite IRAS, 1984).

Sa trace exacte sur le ciel a peu de chances d'être l'écliptique, qui est un plan lié uniquement à la Terre (ou au système Terre-Lune, plus exactement). Jusqu'au XVIIIe siècle, sans doute pour avoir davantage théorisé qu'observé, on a cru que son plan de symétrie était celui de l'équateur du Soleil.

Pour déterminer l'écart entre l'écliptique et le plan de symétrie du nuage zodiacal, la meilleure méthode consiste à viser vers les pôles de l'écliptique. Comme la Terre passe alternativement d'un côté puis de l'autre du plan moyen du nuage, la brillance du ciel dans l'une ou l'autre de ces directions va montrer tantôt un excédent, tantôt un déficit; on doit s'attendre à des variations annuelles sinusoidales, avec une opposition de phase entre nord et sud.

La phase de ces oscillations fournit directement

l'intersection du plan de symétrie avec l'écliptique; l'angle des deux plans s'obtient, presque aussi facilement, d'après l'amplitude.

Appliquée aussi bien à des observations de brillance dans le spectre visible, telles que celles du satellite D2A, qu'à des observations dans l'infra-rouge (émission thermique des poussières, détectée par le satellite IRAS), cette méthode donne un plan de symétrie toujours remarquablement voisin de l'équateur du système solaire: tous les résultats sont proches du "paquet" J-S-U-N de la fig. 4. La fig. 5 montre un assez bon accord de phase en les mesures photométriques et les mesures thermiques; l'écart en amplitude provient d'une Physique distincte (diffusion et émission) et n'a rien de contradictoire.

Les grains interplanétaires orbitent autour du Soleil comme les planètes, et dans le même sens, ainsi que le prouve la spectrométrie des raies d'absorption solaires (raies de Fraunhofer) qu'on détecte par diffusion sur les poussières, mais légèrement décalées par l'effet Doppler-Fizeau dû à leur vitesse radiale moyenne le long de la ligne de visée. On voit que la direction du vecteur moment cinétique global des poussières est gouvernée surtout par les planètes joviennes, bien que le gros du nuage ne paraisse pas les atteindre. Il se peut toutefois que, localement, les planètes telluriques infléchissent la surface moyenne du nuage en direction de leurs plans orbitaux respectifs.

Comme le nuage zodiacal a une masse de l'ordre de 10^{-8} fois celle de la Terre, il va sans dire qu'il s'aligne sur le moment cinétique du système solaire, sans avoir aucune réaction sur lui.

Les comètes et le nuage de Oort

Le moment cinétique des comètes périodiques est négligeable lui aussi, mais celles apparaissant pour la première fois proviennent d'un réservoir appelé le nuage de Oort, qui pourrait contenir quelque 10^{13} noyaux et être 30000 fois plus loin du Soleil que n'est la Terre, soit à 1/2 année de lumière. La population, la masse et le moment cinétique du nuage de Oort sont mal connus ; ce dernier serait de l'ordre de 10^{53} g cm² s⁻¹ selon Marochnik et al. (1988), de 10^{51} selon Weissman (1991) - donc supérieur dans les deux cas à celui de l'ensemble des planètes.

Il faut cependant remarquer que les orientations quelconques des orbites des comètes nouvelles doivent beaucoup réduire la résultante de leurs moments cinétiques. D'autre part, l'introduction de corps situés au dixième de la distance de la plus proche étoile ôte sa validité à l'hypothèse des forces extérieures nulles. Ce sont précisément ces forces extérieures - les attractions stellaires - qui perturbent le nuage de Oort, et expédient des noyaux cométaires vers le Soleil.

Nemesis (?)

Il est tentant, bien que cela manque de rigueur pour la raison précédente, de pousser plus loin encore le recensement des contributions possibles au moment cinétique du système solaire.

Nemesis est le nom de la déesse de la vengeance, qu'on a donné à un très hypothétique compagnon stellaire du Soleil, assez discret pour être resté jusqu'ici inobservable, mais dont l'équipe Alvarez à Berkeley postule l'existence. C'est l'une des explications proposées aux variations probables de l'intensité du bombardement météoritique.

Celui-ci, par bonheur, n'est actuellement pas très sévère, encore qu'un petit noyau cométaire ait fait bien du dégât en Sibérie en 1908. Mais l'intensité du bombardement a déjà été plus forte, et, semble-t-il, à des intervalles assez réguliers, comme le montre un faisceau d'argu-

ments tous controversés, mais impressionnant cependant:

- tendance à une périodicité, de 26 Ma (millions d'années) dans le taux de disparition des espèces animales;
- teneur anormalement élevée en iridium (élément rare dans la croûte terrestre, mais courant dans les météorites) dans les couches géologiques contemporaines de ces disparitions d'espèces;
- périodicité invoquée, d'environ 28 Ma, dans les impacts qui ont creusé les plus grands cratères terrestres.

Pour porter une responsabilité dans ces recrudescences de catastrophes, Nemesis devrait avoir, d'après la troisième loi de Képler, un demi-grand-axe orbital de l'ordre de

$(26.106)^{2/3} \# 88000$ unités astronomiques;

il les provoquerait, lors de ses périhélies, en pénétrant dans le nuage de Oort comme dans un jeu de quilles. Il faut donc lui supposer une orbite excentrique, qui le rejetterait en ce moment non loin de son aphélie, à quelque 150000 u.a. ou 2,3 années de lumière de nous, ce qui est peu pour qu'on ne l'ait pas identifié.

Si Némésis existe, faut-il le faire intervenir dans la théorie des moments cinétiques et de l'équateur du système solaire? Le moment cinétique étant proportionnel à la racine carrée de la distance au Soleil, celui de Nemesis, en supposant à cet astre la même masse qu'à la Terre, égalerait le moment cinétique de Saturne. Doit-on en conclure qu'un Nemesis de masse stellaire, même modeste, posséderait presque tout le moment cinétique circumsolaire, et que l'équateur du système solaire coïnciderait avec son orbite? Non sans doute, car sa distance, bien qu'inférieure à celle d' α Centauri, serait assez grande pour qu'il ne perturbe pas trop le ballet des planètes.

C'est d'une future statistique sur les âges des cratères lunaires, plus nombreux et surtout beaucoup mieux conservés que ceux de la Terre (celui de Rochechouart par exemple, le seul grand de France, est complètement érodé) qu'on peut espérer des indices plus convaincants.

Ce qu'il nous faudrait, c'est le témoignage posthume des dinosaures qui, après plus de 100 Ma de prospérité, se sont éteints assez brusquement vers la limite Crétacé-Tertiaire, il y a 65 Ma environ. Ils nous raconteraient, si cette hypothèse est la bonne, comment ils succombèrent aux désastres écologiques produits par un ou plusieurs gros impacts cométaires - plus intenses, par malchance, que ceux qu'ils avaient déjà essuyés 4 ou 5 fois auparavant... Ou encore, car il faut toujours habiller les pires fléaux d'euphémismes, ils nous diraient comment leur bioclimat s'est altéré par un léger transfert de moment cinétique vers les régions centrales du système solaire.

René Dumont
Observatoire de Bordeaux