

rieurs de Saturne est la cause physique de l'intervalle permanent entre les deux grands anneaux [KIRKWOOD, *On the Nebular hypothesis and the approximate commensurability of the planetary periods* (*Monthly Notices*, XXXIX, 1868, p. 96. *Sidereal Messenger*, 21 février 1884). PROCTOR, *Intellectual Observer*, t. IV, p. 22. MEYER, *Astronomische Nachrichten*, n° 2327].

5° *Les mouvements des satellites de Neptune et d'Uranus sont rétrogrades, et aussi très probablement les mouvements de rotation de ces planètes.* — Cette objection à l'hypothèse de Laplace est considérée par M. Faye comme si importante (1), qu'il en a déduit une théorie nouvelle de la formation des planètes sur laquelle nous aurons à revenir bientôt. Il est donc nécessaire d'en bien apprécier la valeur.

Laplace n'ignorait point que les satellites d'Uranus ne tournent pas comme ceux des autres planètes : « Il paraît, dit-il, d'après les observations d'Herschel, qu'ils se meuvent tous sur un même plan presque perpendiculaire à celui de l'orbite de la planète, ce qui indique évidemment une position semblable dans le plan de son équateur. » (*Exposition du système du Monde*, t. II, p. 121.) Si donc il ne s'est pas laissé arrêter par une circonstance si exceptionnelle, s'il n'en a même pas parlé dans l'exposition, longuement mé-

(1) M. H. FAYE, *Sur l'origine du Monde*, p. 189, et *Bulletin de l'Association scientifique de France*, 2^e série, t. VIII, p. 369 et suiv. M. Faye fait à ce sujet une citation de Laplace que je ne puis considérer comme absolument exacte : « Newton et Laplace croyaient que toutes les rotations, toutes les circulations devaient être de même sens. Laplace est allé plus loin : il a appliqué à cette question le Calcul des probabilités. En tablant sur les planètes et les satellites connus de son temps, son analyse montre que, si l'on venait à découvrir un nouveau satellite ou une nouvelle planète, il y aurait des milliards à parier contre un que la circulation de ce système ou la rotation de cette planète serait directe, comme toutes les autres... L'étude des satellites d'Uranus et la découverte du système de Neptune n'ont pas tardé à réduire à néant cette probabilité et la célèbre cosmogonie de Laplace. » Le texte de Laplace, que j'ai déjà cité, est celui-ci : « Des phénomènes aussi extraordinaires (identité du sens des mouvements de circulation et de rotation) ne sont point dus à des causes irrégulières. En soumettant au calcul leur probabilité, on trouve qu'il y a plus de deux cent mille milliards à parier contre un qu'ils ne sont point l'effet du hasard ; ce qui forme une probabilité bien supérieure à celle de la plupart des événements historiques dont nous ne doutons point. Nous devons donc croire, au moins avec la même confiance, qu'une cause primitive a dirigé les mouvements des planètes. »

ditée, de son système cosmogonique, c'est qu'il a considéré ce fait comme étranger à l'origine même d'Uranus et comme devant être expliqué par des causes agissant postérieurement à la naissance de la planète. En effet, de quelque manière que l'on conçoive la nébuleuse primitive, dès que les mouvements des planètes résultent du mouvement de rotation de cette nébuleuse autour d'un axe, ces mouvements s'exécutent nécessairement, à l'origine, dans le plan équatorial de la nébuleuse. Que la nébuleuse tourne tout d'une pièce avec une même vitesse angulaire de ses particules, ou que, suivant la conception de M. Faye, que j'exposerai plus loin, la vitesse linéaire de ces particules aille d'abord en croissant avec la distance au centre pour décroître ensuite, les orbites des planètes et leurs équateurs sont nécessairement au premier moment compris dans le plan général de la rotation. Directe ou rétrograde, la rotation d'Uranus s'effectuait autour d'un axe perpendiculaire à ce plan, et il faut expliquer comment la planète a pu culbuter ensuite, de manière à coucher son axe dans le plan de son orbite.

Ramenée à ces termes, la question se généralise d'une singulière façon ; car il n'y a aujourd'hui qu'une seule planète, Jupiter, qui ait conservé la perpendicularité de son axe au plan de son orbite. Les inclinaisons des équateurs sont pour les autres planètes très différentes de zéro. En voici le Tableau ; j'y joins les inclinaisons des plans des satellites :

	Équateur.	Satellites.
Mercure.....	70°	0
Vénus.....	49.48	»
Terre.....	23.27	5. 8
Mars.....	24.52	25.34
Jupiter.....	3. 6	3. 6 à 2.40
Saturne.....	26.48	26.48 (anneau)
Uranus.....	80 (Buffham) 57 (Henry)	98. 1
Neptune.....	»	146. 8

Si l'on admet les inclinaisons, très incertaines il est vrai, données pour Mercure et Vénus, il est singulier de voir cet élément varier d'une façon très régulière et prendre sa valeur maxima aux deux extrémités du système, tandis qu'il s'annule presque pour la planète moyenne Jupiter. Quoi qu'il en soit de cette remarque, il faut trouver la cause d'une inclinaison qui n'existait pas à l'origine.

A cette déviation de la régularité primitive du système, il faut joindre encore celle-ci : les plans des orbites n'ont pas non plus conservé leur coïncidence primitive avec le plan de l'équateur de la nébuleuse. Ce dernier est très probablement représenté aujourd'hui par le plan du maximum des aires ou plan invariable du système. D'après les calculs de M. Stockwell (*Smithsonian contributions to knowledge*, vol. XVIII, p. 166, Washington), la position de ce plan est définie comme il suit par rapport à l'écliptique fixe de 1850 :

Longitude du nœud ascendant.....	106.14. 6",00
Inclinaison.....	1.55.19,376.

L'explication de ces inclinaisons n'a été qu'indiquée par Laplace : « Si le système solaire s'était formé avec une parfaite régularité, les orbites des corps qui le composent seraient des cercles dont les plans, ainsi que ceux des divers équateurs et des anneaux, coïncideraient avec le plan de l'équateur solaire ; mais on conçoit que les variétés sans nombre, qui ont dû exister dans la température et la densité des diverses parties de ces grandes masses, ont produit les excentricités de leurs orbites, et les déviations de leurs mouvements, du plan de cet équateur. » (*Exp. du Syst. du monde*, t. II, p. 559.)

M. Trowbridge a cherché à préciser un peu plus ces causes d'altération de la régularité idéale du système : « Si les matériaux composant les anneaux étaient distribués de manière à faire qu'une plus grande masse fût détachée d'un côté de l'équateur que de l'autre, il en résulterait, au moment de la séparation de l'anneau, un changement dans la direction de l'axe de rotation du corps tournant (le sphéroïde solaire), et ainsi chaque anneau pourrait être incliné par rapport à celui qui s'est détaché avant lui ; mais, comme la masse d'un anneau n'a jamais été qu'une très petite fraction de la masse totale, la séparation de cet anneau n'a pu changer que très peu l'axe de rotation de la nébuleuse. On doit donc s'attendre à trouver les planètes confinées dans une zone étroite du ciel. » [TROWBRIDGE, *On the nebular Hypothesis* (*Silliman's Journal*, 2^e série, t. XXXVIII, p. 358)]. Il suivrait de là que la première planète formée doit avoir son orbite en coïncidence avec le plan invariable, et c'est en effet ce qui a lieu à très peu près

pour Neptune. M. Trowbridge se hasarde même à prédire que, si l'on découvre jamais une planète extraneptunienne, son orbite se rapprochera plus encore de ce plan.

Il reste à expliquer l'inclinaison plus prononcée de l'orbite de Mercure, et les inclinaisons considérables de plusieurs des planètes télescopiques. Dans ses recherches astronomiques sur les inégalités séculaires (*Annales de l'Observatoire*, t. II, p. 165), Le Verrier a indiqué la cause possible de ces écarts : « Lors même que les inclinaisons relatives des orbites sont très petites à l'origine du temps, il ne s'ensuit pas qu'elles resteront éternellement très petites, quels que soient les rapports des grands axes. Il existe, par exemple, entre Jupiter et le Soleil, une position telle, que si l'on y plaçait une petite masse, dans une orbite d'abord peu inclinée à celle de Jupiter, cette petite masse pourrait sortir de son orbite primitive, et atteindre de grandes inclinaisons sur le plan de l'orbite de Jupiter, par l'action de cette planète et de Saturne. Il est remarquable que cette position se trouve à très peu près à une distance double de la distance de la Terre au Soleil, c'est-à-dire à la limite inférieure de la zone où l'on a rencontré jusqu'ici les petites planètes. Il existe entre Vénus et le Soleil une autre étendue où, en vertu des actions perturbatrices de Vénus et de la Terre, les inclinaisons d'une petite masse pourraient grandir considérablement. Mercure se trouve placé à l'une des extrémités de cette étendue, et ses inclinaisons sont considérables. Elles pourraient atteindre jusqu'à près de 9° relativement à l'orbite de Vénus. »

L'examen de la question ainsi indiquée par Le Verrier a été repris par M. F. Tisserand (*Comptes rendus*, t. XCIV, p. 997, 1882). Il a démontré qu'en effet l'inclinaison de l'orbite d'une petite masse m sous l'action de deux masses m' et m'' très grandes peut devenir considérable. Mais il y a une limite à la valeur de cette inclinaison, qui est atteinte pour une distance 2,0548 et qui est 24° 43' environ. Une seule des petites planètes, Pallas, a une inclinaison notablement supérieure à cette limite.

La question de l'obliquité des axes de rotation des planètes sur leurs orbites a été abordée d'abord par M. Ch. Simon, puis par M. G.-H. Darwin.

M. Ch. Simon, dans son Mémoire sur la rotation de la Lune, dont nous avons déjà parlé (*Annales de l'École Normale*, 1^{re} série,

t. VI, p. 73; 1869), a été conduit à examiner la question qui nous occupe maintenant. Partant des formules données par Liouville (*Conn. des Temps*, 1859) pour déterminer le mouvement de précession d'un ellipsoïde animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe incliné sur le plan de l'orbite, il montre que le globe fluide de la Terre, malgré sa contraction progressive et l'accroissement de vitesse qui en résultait et produisait un aplatissement de plus en plus considérable, aurait conservé constante l'inclinaison moyenne de son équateur sur l'écliptique; mais une autre cause est intervenue pour changer cette obliquité. Si, après la formation de la Lune, il s'est formé autour de la Terre une série d'anneaux de Laplace, comme on n'en retrouve plus trace autour de la Terre, il faut supposer que ces anneaux, en se refroidissant, se sont contractés à la manière d'anneaux solides et ont fini par se réunir à la Terre. Or, sous l'action du Soleil ou du noyau central de la nébuleuse, l'inclinaison de ces anneaux sur l'écliptique augmente avec le temps. La réunion de pareils anneaux à la Terre, en changeant la forme du renflement équatorial, a donc dû accroître l'inclinaison de l'équateur terrestre sur l'écliptique.

On comprendrait donc comment les planètes les plus voisines du Soleil, Mercure et Vénus, qui n'ont pas de satellites, peuvent tourner autour d'un axe fortement incliné sur le plan de l'orbite; comment aussi la Terre peut avoir son équateur incliné de $23^{\circ}30'$, tandis que l'orbite lunaire n'est inclinée que de quelques degrés. Pour Mars, la formation des satellites est postérieure à la réunion des anneaux producteurs de l'obliquité, puisque les orbites de ces satellites coïncident avec l'équateur de la planète. Il n'y a pas là de difficultés, parce que ces satellites sont très voisins de la planète et se sont formés très tard. Mais, si nous arrivons à Saturne, à Uranus, pour lesquels la même coïncidence existe en même temps qu'une forte obliquité de l'équateur, on est en droit de se demander comment ces anneaux ont pu se former et subsister jusqu'à la réunion avec la planète, et comment, à si grande distance du Soleil, l'action perturbatrice de celui-ci a pu produire des obliquités considérables.

M. G.-H. Darwin, dans une série d'importants Mémoires présentés à la Société Royale et sur lesquels nous aurons à revenir, traite le sujet actuel de l'obliquité des axes des planètes à un point

de vue complètement différent de celui qu'a envisagé M. Simon. Il suppose la planète à l'état de sphéroïde visqueux, dont la forme s'altère lentement par des causes externes et internes. De son analyse il ressort que tout accroissement de la protubérance équatoriale d'un tel sphéroïde doit tendre à augmenter l'obliquité de l'équateur sur le plan de l'orbite [*The nebular hypothesis and the obliquity of the axis of planets to their orbits* (*The Observatory*, t. I, p. 135)]. Il est vrai que, lorsqu'on calcule la grandeur de cet accroissement, on trouve qu'une surélévation du renflement de la Terre, égale en hauteur à l'Himalaya et de plusieurs degrés de largeur, rapprocherait les cercles arctiques des tropiques de quelques pouces seulement. Il suit de là que ce n'est pas depuis le commencement de l'époque géologique que s'est produite l'obliquité de l'équateur sur l'écliptique. Mais, s'il est permis d'appliquer à une masse nébuleuse les mêmes raisonnements qu'à une masse solide plastique, et c'est l'opinion de M. W. Thomson (*Address to section A, British Association at Glasgow*, sept. 1876), M. Darwin trouve que le changement d'obliquité s'est produit, mais si lentement que lorsque la Terre s'étendait jusqu'à remplir l'orbite lunaire, l'obliquité devait avoir déjà à peu près la même valeur qu'aujourd'hui. Elle n'était que de quelques minutes lorsque le diamètre de la nébuleuse terrestre était un millier de fois plus grand que le diamètre actuel de la Terre.

Dans le cas des planètes dépourvues de satellites, c'est le Soleil seul qui a produit la précession et par suite l'obliquité. Celle-ci doit donc être plus grande pour les planètes voisines du Soleil. Pour expliquer l'obliquité des équateurs des planètes éloignées, M. G. Darwin est donc obligé de faire intervenir l'action des satellites.

Mais en admettant même les hypothèses et la théorie de M. Darwin, on se heurte encore à bien des difficultés. Si l'obliquité de l'équateur terrestre était déjà de 23° à l'époque où s'est formée la Lune, pourquoi l'orbite de celle-ci n'est-elle inclinée que de 5° sur l'écliptique? Si les satellites de Saturne ont contribué, concurremment avec le Soleil, à produire l'inclinaison de l'équateur de Saturne, ils existaient donc avant cette obliquité et devaient circuler dans le plan de l'orbite de la planète qui était aussi le plan de son équateur! Comment aujourd'hui se trouvent-ils tous, sauf

un, dans le plan de l'équateur incliné? La question me semble donc encore loin d'avoir sa solution.

En résumé, de toutes les objections qui ont été élevées contre les conceptions de notre grand géomètre, il me semble que la discussion précédente n'en a laissé subsister qu'un bien petit nombre. Sans doute, nous ne pouvons plus concevoir la nébuleuse solaire à la manière primitive de Laplace. Ainsi que l'a fait remarquer M. Faye, la préexistence d'un globe possédant toute la masse du système solaire et toute son énergie mécanique, dont l'atmosphère se dilate un jour jusqu'aux limites du monde actuel par l'action d'une chaleur intense, d'origine non définie, c'est là une pure hypothèse qui n'est fondée sur aucun fait d'observation. Déjà Laplace, nous l'avons vu, se faisait du Soleil, à la fin de sa vie, une idée bien différente de celle qu'il avait mise en avant en 1792. Les notions introduites par la Thermodynamique sont venues éclaircir l'origine mystérieuse de la chaleur solaire et modifier, par conséquent, le mode de contraction de la nébuleuse. Ce n'est plus le refroidissement seul, c'est surtout l'attraction qui produit la diminution de volume et donne naissance, dès l'origine, à cette condensation centrale, noyau du Soleil futur, qui remplace le globe solide ou liquide de Laplace, indispensable à la formation des planètes. Mais, une fois cet état de choses établi, nous sommes en face d'un système absolument semblable à celui que notre grand géomètre a placé à l'origine du monde planétaire. Les notions nouvelles n'ont donc fait que substituer une base scientifique à l'hypothèse qu'avait dû adopter Laplace; elles n'ont rien changé au développement ultérieur de sa conception.

Sans doute aussi Laplace n'avait pas, dans les quelques pages qu'il a consacrées à l'exposition de son système cosmogonique, prévu toutes les difficultés, indiqué tous les cas singuliers que des découvertes ultérieures ont fait reconnaître; cependant l'étude attentive de son texte montre le soin extrême qu'il avait apporté dans la discussion de la plupart de ces points délicats. L'œuvre de ses successeurs, et en particulier de M. Roche, a été de compléter sur certains points l'exposition de Laplace, de corriger parfois ce qu'elle avait de trop absolu dans ses termes; et il en est résulté, à mon avis, un ensemble presque entièrement satisfaisant. Il ne reste,

me paraît-il, que deux points obscurs : 1° comment la matière d'un anneau a-t-elle pu se condenser en une seule planète de grande dimension? 2° comment a été produite la forte inclinaison des équateurs et des orbites des satellites de plusieurs planètes sur les plans de leurs orbites? Mais ces deux difficultés ne sont pas particulières à la conception de Laplace; elles se rencontrent dans toute hypothèse qui fait naître les planètes d'anneaux intérieurs ou extérieurs à une nébuleuse en mouvement de rotation. Nous allons les retrouver entières dans l'hypothèse que M. Faye a proposé, en 1880, de substituer à celle de Laplace.