

Pierre-Simon de Laplace (1749-1827)

Club Altaïr du lycée Grignard
de Cherbourg

HISTOIRE

René Cavaroz, président du club Altaïr nous a envoyé cette étude, réalisée à l'occasion du 250^e anniversaire de la naissance de Laplace, en hommage au grand astronome, physicien et mathématicien.

Ont participé à ce travail des élèves de 2^{de} 8 et de 1^{ère} S₁ du lycée, Mme Dubourdiou, professeur, M. Weyant, membre de l'Association Normande d'astronomie et le club d'Astronomie de Querqueville Hague (50).

I - Quelques repères

Des débuts fulgurants

Laplace est né à Beaumont-en-Auge, en Normandie, d'une riche famille d'agriculteurs, le 23 mars 1749. Il entre à l'Université de Caen avec l'idée de devenir prêtre, mais, à l'âge de 19 ans, il se rend à Paris, où, remarqué par d'Alembert, il est nommé professeur de mathématiques à l'École Militaire.

*"Ne tenez pour certain
que ce qui est démontré".*

Deux oeuvres magistrales

- le **Traité de Mécanique Céleste** est un monument à lui seul : 5 tomes dont la publication, commencée en 1799 ne s'achèvera qu'en 1828, l'année suivant la mort de Laplace. Fait exceptionnel à l'époque, l'ouvrage a été traduit en anglais par le géomètre américain Bowditch et publié aux Etats-Unis.

- l'**Exposition du Système du Monde**, éditée en 1796 et cinq fois rééditée jusqu'en 1835 est contrairement à son **Traité de Mécanique Céleste**, accessible au public le plus large : on dirait aujourd'hui un ouvrage de vulgarisation.

Voici l'introduction de Laplace à son "Exposition du Système du Monde" :

"De toutes les sciences naturelles, l'Astronomie est celle qui présente le plus long enchaînement de découvertes. Il y a extrêmement loin de la première vue du ciel, à la vue générale par laquelle on embrasse aujourd'hui les états passés et futurs du système du monde. Pour y parvenir, il a fallu observer les astres pendant un grand nombre de siècles ; reconnaître dans leurs apparences les mouvements réels de la Terre ; s'élever aux lois des mouvements planétaires, et de ces lois, au principe de la pesanteur universelle ; redescendre enfin de ce principe, à l'explication complète de tous les phénomènes célestes, jusque dans leurs moindres détails. Voilà ce que l'esprit humain a fait dans l'Astronomie. L'exposition de ces découvertes et de la manière la plus simple dont elles ont pu naître et se succéder, aura le double avantage d'offrir un grand ensemble de vérités importantes, et la vraie méthode qu'il faut suivre dans la recherche des lois de la nature. C'est l'objet que je me suis proposé dans cet ouvrage"

Un calculateur inspiré

Laplace a démontré que les grands axes des orbites des planètes ne changent pas, ni par conséquent, les périodes de révolution autour du Soleil, ce qui apportait un début de solution au problème de la stabilité du système solaire. Il a établi des formules donnant la position de toutes les planètes, rendant compte, par là-même, des inégalités de vitesse de Jupiter et de Saturne :

"c'était la solution définitive d'une difficulté immense qui faisait douter que la pesanteur universelle suffit à l'explication des phénomènes du firmament" dira Arago.

Les mouvements de la Lune, une mine féconde

Certaines perturbations des mouvements de la Lune dépendent de la distance Terre-Soleil ; Laplace en fait la théorie et calcule la distance tant prise. Il montre que deux autres perturbations sont dues à l'aplatissement de la Terre et donne, pour la première fois, une valeur moyenne de l'aplatissement du globe terrestre : $1 / 306$; la valeur retenue de nos jours est $1 / 298,25$.

La masse de la Lune et les marées

Le Soleil et la Lune exercent leur attraction sur notre planète-océan. Laplace, à partir de vingt années d'observations des marées à Brest a déterminé la masse de la Lune. Par l'étude des oscillations de l'océan, il a estimé qu'il faudrait quelque 75 Lunes pour former la masse de la Terre (valeur admise : 82). Ce faisant, il a contribué à améliorer la théorie des marées et c'est, en partie, grâce à lui, qu'on sait prévoir leur retour et leur amplitude.

L'énigme de l'anneau de Saturne

Laplace considéra qu'il était improbable que l'anneau de Saturne fût fixe : il ne saurait ainsi résister par sa seule cohésion à la force d'attraction de la planète. Il calcula la vitesse de rotation nécessaire à sa conservation. La vitesse calculée était égale à celle qu'Herschel devait déduire plus tard de ses observations visuelles.

II - Pour le 250^e anniversaire de Pierre-Simon de Laplace : un texte célèbre

Pour commémorer l'événement, il nous a semblé intéressant d'évoquer, une fois encore, la célèbre hypothèse de l'astronome normand sur la formation du système solaire, en publiant le texte intégral de la fameuse "**Note VII et dernière**" qui clôt son Exposition du Système du Monde, parue en 1796. (voir Capella n° 33, p. 7-14).

L'hypothèse de Laplace n'est plus acceptée telle quelle aujourd'hui. Elle postulait l'existence d'une nébuleuse solaire primitive très chaude en rotation qui, par refroidissement et condensation, aurait donné successivement naissance à une série d'anneaux de matière fluide s'agglomérant progressivement en planètes et en satellites.

Les objections les plus sérieuses auxquelles se heurte l'hypothèse de Laplace sont principalement de trois sortes. L'une concerne le sens de rotation des planètes et des satellites qui était au point de départ de la théorie. Laplace affirmait que ces corps tournent tous dans le même sens à la fois sur leurs orbites et autour de leurs axes de rotation respectifs. On sait aujourd'hui que les rotations de Vénus et d'Uranus se font dans le sens rétrograde, et il en va de même de plusieurs satellites des planètes externes. En second lieu, la nébuleuse solaire primitive, que Laplace supposait très chaude, devait au contraire, selon la vision moderne, avoir été excessivement froide pour que les forces d'attraction pussent vaincre les forces dispersives de l'agitation moléculaire.

Mais l'objection la plus sévère réside dans le fait que le moment angulaire du système solaire devrait, dans l'hypothèse de Laplace, être concentré dans le Soleil, alors qu'en réalité il est presque entièrement dans les planètes. Rappelons que le moment angulaire d'un système en rotation (un ou plusieurs corps tournant autour du même centre) est le produit de la masse du ou des corps tournants, de leur distance au centre de révolution et de leur vitesse de translation. Ce produit est constant (loi de conservation du moment angulaire).

"Lorsqu'on fait tourner une fronde et que l'on raccourcit brusquement la ficelle, la pierre se met à tourner beaucoup plus vite. Le moment angulaire doit en effet se conserver. De même, si, suivant Laplace, le Soleil résulte de la contraction d'un nuage en rotation, il doit tourner très vite sur lui-même, beaucoup plus vite qu'il ne tourne réellement. La vitesse à l'équateur du Soleil devrait être de 472 km / s ; elle n'est en réalité que de 1,9 km / s, soit 250 fois plus faible ! La théorie de la nébuleuse primitive ne permet donc pas d'expliquer l'importante propriété fondamentale formulée plus haut : presque toute la masse du système solaire est concentrée dans le Soleil, mais celui-ci ne représente que 2 % du moment angulaire total. Autrement dit, c'est parce que le Soleil ne tourne pas en deux heures sur lui-même, mais en 27 jours, que les idées de Kant et de Laplace furent abandonnées."

(Henri Van Regemorter : Origine et évolution du système solaire, in Encyclopédie de la Pléiade, Astronomie, 1962, p. 1270-1271).

En dépit de ces objections, les théories plus récentes de l'origine du système solaire s'inspirent néanmoins, peu ou prou, de l'idée de la nébuleuse solaire de Laplace. Cette hypothèse aura, en tout cas, joué un rôle historique indéniable et méritait, ne fût-ce que pour cette raison, d'être rappelée.

Lors des cérémonies commémoratives du bicentenaire de Laplace, en 1949, André Danjon, directeur de l'Observatoire de Paris de 1945 à 1967, évoqua avec émotion le choc qu'il avait éprouvé lorsque, élève de la classe de Cinquième au Lycée Malherbe de Caen, il fut confronté pour la première fois au texte de la note VII de l'Exposition du système du monde :

"Ce jour-là, dit-il, nous ne prêtâmes guère attention aux difficultés grammaticales ou orthographiques du texte, tant nous étions saisis d'étonnement, d'admiration et même d'un peu d'effroi, devant ce langage si nouveau pour nous, si différent de la prose melliflue de Fénelon à laquelle nous étions accoutumés, et qui nous entraînait dans un pays de rêve."

En reproduisant intégralement le texte de Laplace, nous avons simplement modernisé l'orthographe de certains mots (mouvement au lieu de mouvemen, etc.), mis une majuscule à Soleil, Terre et Lune, et allégé la très lourde ponctuation de l'édition originale. Le terme "orbe" qui peut troubler le lecteur moderne doit être entendu au sens de "orbite". Afin de faciliter la lecture du texte, il nous a semblé utile, en guise d'introduction, de résumer très sommairement l'idée directrice de chaque paragraphe. Les numéros du résumé sont les mêmes que ceux que nous avons affectés à chaque alinéa de l'original.

Sommaire introductif au texte de Laplace

1 - Point de départ, un constat en cinq points :

- la révolution des planètes s'effectue dans le même sens et à peu près dans un même plan ;
- la révolution des satellites se fait dans le même sens que celle des planètes ;
- les rotations des planètes et des satellites ont lieu dans le même sens que leurs révolutions ;
- les orbites des planètes et des satellites ne présentent qu'une faible excentricité ;
- les comètes ont des orbites très allongées et situées dans des plans différents.

2 - Théorie de Buffon sur l'origine du système solaire : les planètes et les satellites sont des fragments du Soleil arrachés par l'impact d'une comète. [Laplace dit qu'il ne connaît que la théorie de Buffon sur l'origine du système solaire. Il n'avait manifestement pas connaissance de l'hypothèse du philosophe allemand Immanuel Kant, pourtant assez voisine de la sienne et formulée dès 1755.]

3 - Examen critique de la théorie de Buffon : elle ne rend compte que du premier phénomène énoncé dans le §1.

4 - L'excentricité très faible des orbites planétaires et satellitaires est incompatible avec la théorie de Buffon.

5 - Nécessité de postuler l'existence d'une nébuleuse solaire primitive de très grande dimension.

6 - Comparaison avec les nébuleuses observées au télescope : extrême dilution de la matière.

7 - Exemples de nébuleuses à noyaux de condensation multiples : les Pléiades et les étoiles doubles.

8 - Les planètes et les satellites ne sont pas des corps allochtones qui auraient pénétré dans la nébuleuse solaire.

9 - Conditions régnant dans une nébuleuse chaude en rotation :

a) équilibre, en tous points, entre la force centrifuge et la pesanteur ;

b) conservation du moment cinétique lors de la contraction par refroidissement ;

c) à la suite de la contraction et de l'accroissement de la force centrifuge due à l'augmentation de la rotation du Soleil, rupture de l'équilibre force centrifuge-pesanteur et abandon de matière à la périphérie. [Les théories modernes voient plutôt une nébuleuse très froide au départ, la chaleur étant progressivement engendrée au centre par suite de la compression gravitationnelle].

10.- Matière périphérique abandonnée sous forme d'anneaux de vapeurs.

11.- Noyaux de condensation au sein des anneaux, donnant naissance à des masses sphériques tournant sur elles-mêmes dans le même sens que l'ensemble autour du Soleil : protoplanètes ("planètes à l'état de vapeurs").

12.- Le phénomène qui a donné naissance aux anneaux, puis aux protoplanètes se reproduit à plus petite échelle au sein des protoplanètes pour former des embryons de satellites.

13.- La durée de rotation des corps centraux (Soleil par rapport aux planètes, planètes par rapport aux satellites) est plus faible que celle des corps qui en dépendent.

14.- Les petits écarts de la forme des orbites par rapport au cercle (excentricités), et de leur plan par rapport au plan équatorial du Soleil (inclinaisons des plans orbitaux) s'expliquent par des irrégularités inévitables dans la répartition des températures et des densités au sein des masses de vapeurs.

15 - Cas des comètes : elles sont étrangères au système solaire. [Cette idée, déjà émise par Descartes, de comètes vagabondant d'un système stellaire à un autre, est depuis longtemps totalement abandonnée. Les comètes, reléguées en très grand nombre aux confins externes du système solaire, sont bel et bien des membres à part entière de celui-ci].

16.- Faible probabilité de comètes à orbites hyperboliques.

17.- Les orbites cométaires ont pu être modifiées par l'attraction des planètes.

18 - Inversement, l'action attractive des comètes a pu modifier légèrement les caractéristiques orbitales des planètes.

19 - Poussières résiduelles (molécules très volatiles) à l'origine de la lumière zodiacale.

20 - Hypothèse de Laplace confirmée par les caractéristiques géométriques et physiques des planètes (aplatissement polaire expliqué par la nature primitivement fluide du corps en rotation). La géologie pourra sans doute étayer l'hypothèse de Laplace, quoique la grande variété de combinaisons des matériaux issus des vapeurs initiales et les modifications ultérieures qui se sont produites au sein et à la surface de la Terre en compliquent l'étude.

21 - L'hypothèse de Laplace basée sur le caractère primitivement fluide des satellites soumis à l'attraction gravitationnelle des planètes-mères explique aussi les singuliers phénomènes de résonance observés entre les durées de révolution et la période de rotation de ces satellites. Cas le plus simple : celui de la Lune.

22 - Résonance plus complexe entre les trois premiers satellites de Jupiter.

III - La " note VII et dernière " de l'Exposition du Système du Monde, de Pierre Simon de Laplace

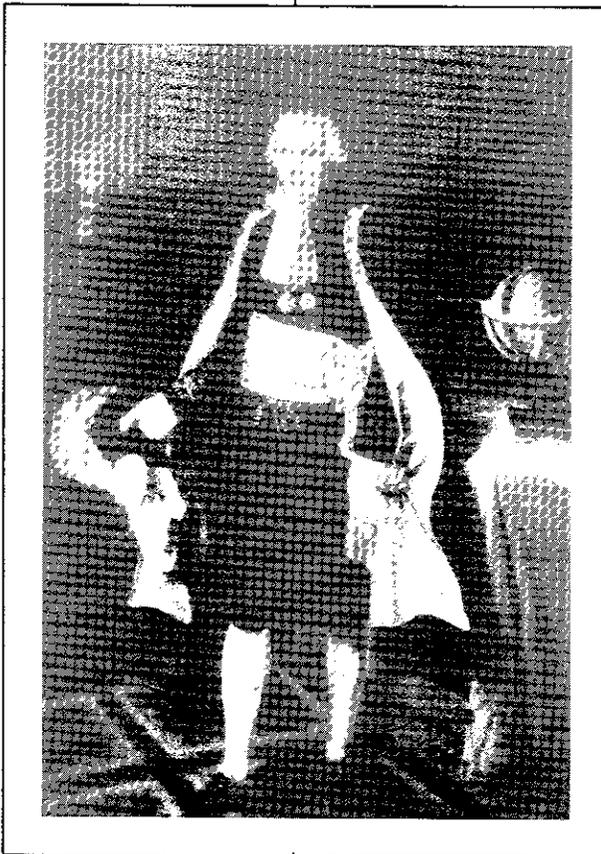
1 - On a, par le chapitre précédent, pour remonter à la cause des mouvements primitifs du système planétaire, les cinq phénomènes suivants : les mouvements des planètes dans le même sens, et à peu près dans un même plan; les mouvements des satellites dans le même sens que ceux des planètes; les mouvements de rotation de ces différents corps et du Soleil dans le même sens que leurs mouvements de projection et dans des plans peu différents; le peu d'excentricité des orbites des planètes et des satellites; enfin, la grande excentricité des orbites des comètes, quoique leurs inclinaisons aient été abandonnées au hasard.

2 - Buffon est le seul que je connaisse, qui depuis la découverte du vrai système du monde, ait essayé de remonter à l'origine des planètes et des satellites. Il suppose qu'une comète, en tombant sur le Soleil, en a chassé un torrent de matière qui s'est réunie au loin en divers globes plus ou moins grands et plus ou moins éloignés de cet astre : ces globes, devenus par leur refroidissement opaques et solides, sont les planètes et leurs satellites.

3 - Cette hypothèse satisfait au premier des cinq phénomènes précédents; car il est clair que tous les corps ainsi formés doivent se mouvoir à peu près dans le plan qui passait par le centre du Soleil et par la direction du torrent de matière qui les a produits : les quatre autres phénomènes me paraissent inexplicables par son moyen. A la vérité, le mouvement absolu des molécules d'une planète doit être alors dirigé dans le sens du mouvement de son centre de gravité; mais il ne s'ensuit point que le mouvement de rotation de la planète soit dirigé dans le même sens : ainsi, la Terre pourrait tourner d'orient en occident, et cependant le mouvement absolu de chacune de ses molécules serait dirigé d'occident en orient ; ce qui doit s'appliquer au mouvement de révolution des satellites, dont la direction, dans l'hypothèse dont il s'agit n'est pas nécessairement la même que celle du mouvement de projection des planètes.

4 - Un phénomène, non seulement très difficile à expliquer dans cette hypothèse, mais qui lui est contraire, est le peu d'excentricité des orbites planétaires. On sait par la théorie des forces centrales, que si un corps mû dans un orbe rentrant autour du Soleil rase la surface de cet astre, il y reviendra constamment à chacune de ses révolutions; d'où il suit que si les planètes avaient été primitivement détachées du Soleil, elles le toucheraient à chaque retour vers cet astre, et leurs or-

bes loin d'être circulaires, seraient fort excentriques. Il est vrai qu'un torrent de matière, chassé du Soleil, ne peut pas être exactement comparé à un globe qui rase sa surface : l'impulsion que les parties de ce torrent reçoivent les unes des autres, et l'attraction réciproque qu'elles exercent entre elles, peuvent, en changeant la direction de leurs mouvements, éloigner leurs périhélies du Soleil. Mais leurs orbites devraient toujours être fort excentriques, ou du moins ils n'auraient pu avoir tous de petites excentricités que par le hasard le plus extraordinaire. Enfin on ne voit point, dans l'hypothèse de Buffon, pourquoi les orbites de plus de cent comètes déjà observées sont tous fort allongés : cette hypothèse est donc très éloignée de satisfaire aux phénomènes précédents. Voyons s'il est possible de s'élever à leur véritable cause.



5 - Quelle que soit sa nature, puisqu'elle a produit ou dirigé les mouvements des planètes, il faut qu'elle ait embrassé tous ces corps; et vu la distance prodigieuse qui les sépare, elle ne peut avoir été qu'un fluide d'une immense étendue. Pour leur avoir donné dans le même sens un mouvement presque circulaire autour du Soleil, il faut que ce fluide ait environné cet astre comme une atmosphère. La considération des mouvements planétaires nous conduit donc à penser qu'en vertu d'une chaleur excessive, l'atmosphère du Soleil s'est primitivement étendue au-delà des orbites de toutes les planètes, et qu'elle s'est resserrée successivement jusqu'à ses limites actuelles.

6 - Dans l'état primitif où nous supposons le Soleil, il ressemblait aux nébuleuses que le télescope nous montre composées d'un noyau plus ou moins brillant, entouré d'une nébulosité qui, en se condensant à la surfa-

ce du noyau, le transforme en étoile. Si l'on conçoit, par analogie, toutes les étoiles formées de cette manière, on peut imaginer leur état antérieur de nébulosité, précédé lui-même par d'autres états dans lesquels la matière nébuleuse était de plus en plus diffuse, le noyau étant de moins en moins lumineux. On arrive ainsi, en remontant aussi loin qu'il est possible, à une nébulosité tellement diffuse que l'on pourrait à peine en soupçonner l'existence.

7 - Depuis longtemps la disposition particulière de quelques étoiles visibles à la vue simple a frappé des observateurs philosophes. Mitchel a déjà remarqué combien il est peu probable que les étoiles des Pléiades, par exemple, aient été resserrées dans l'espace étroit qui les renferme, par les seules chances du hasard; et il en a conclu que ce groupe d'étoiles et les groupes semblables que le ciel nous présente sont les effets d'une cause primitive ou d'une loi générale de la nature.

Ces groupes sont un résultat nécessaire de la condensation des nébuleuses à plusieurs noyaux; car il est visible que la matière nébuleuse étant sans cesse attirée par ces noyaux divers, ils doivent former à la longue, un groupe d'étoiles, pareil à celui des Pléiades. La condensation des nébuleuses à deux noyaux formera semblablement des étoiles très rapprochées, tournant l'une autour de l'autre, telles que les étoiles doubles dont on a déjà reconnu les mouvements respectifs.

8 - Mais comment l'atmosphère solaire a-t-elle déterminé les mouvements de rotation et de révolution des planètes et des satellites ? Si ces corps avaient pénétré profondément dans cette atmosphère, sa résistance les aurait fait tomber sur le Soleil ; on peut donc conjecturer que les planètes ont été formées à ces limites successives par la condensation des zones de vapeurs, qu'elle a dû, en se refroidissant, abandonner dans le plan de son équateur.

9 - Rappelons les résultats que nous avons donnés dans le dixième chapitre du livre précédent. L'atmosphère du Soleil ne peut pas s'étendre indéfiniment : sa limite est le point où la force centrifuge due à son mouvement de rotation balance la pesanteur. Or à mesure que le refroidissement resserre l'atmosphère et condense à la surface de l'astre les molécules qui en sont voisines, le mouvement de rotation augmente. Car en vertu du principe des aires, la somme des aires décrites par le rayon vecteur de chaque molécule du Soleil et de son atmosphère, et projetées sur le plan de son équateur, étant toujours la même, la rotation doit être plus prompte quand ces molécules se rapprochent du centre du Soleil. La force centrifuge due à ce mouvement devenant ainsi plus grande, le point où la pesanteur lui est égale est plus près de ce centre. En supposant donc, ce qu'il est naturel d'admettre, que l'atmosphère s'est étendue à une époque quelconque jusqu'à sa limite, elle a dû, en se refroidissant, abandonner les molécules situées à cette limite et aux limites successives produites par l'accroissement de la rotation du Soleil. Ces molécules abandonnées ont continué de circuler autour de cet astre, puisque leur force centrifuge était balancée par leur pesanteur. Mais cette égalité n'ayant point lieu par rapport aux molécules atmosphériques placées sur les parallèles à l'équateur solaire, celles-ci se sont rapprochées par leur pesanteur de l'atmosphère, à mesure qu'elle se condensait, et elles n'ont cessé de lui appartenir qu'autant que par ce mouvement elles se sont rapprochées de cet équateur.

10 - Considérons maintenant les zones des vapeurs successivement abandonnées. Ces zones ont dû, selon toute vraisemblance, former par leur condensation et l'attraction mutuelle de leurs molécules, divers anneaux concentriques de vapeurs circulant autour du Soleil. Le frottement mutuel des molécules de chaque anneau a dû accélérer les unes et retarder les autres, jusqu'à ce qu'elles aient acquis un même mouvement angulaire. Ainsi les vitesses réelles des molécules plus éloignées du centre de l'astre ont été plus grandes. La cause suivante a dû contribuer encore à cette différence de vitesses. Les molécules les plus distantes du Soleil, et qui par les effets du refroidissement et de la condensation, s'en sont rapprochées pour former la partie supérieure de l'anneau, ont toujours décrit des aires proportionnelles aux temps, puisque la force centrale dont elles étaient animées a été constamment dirigée vers cet astre. Or cette constance des aires exige un

accroissement de vitesse, à mesure qu'elles s'en sont rapprochées. On voit que la même cause a dû diminuer la vitesse des molécules qui se sont élevées vers l'anneau pour former sa partie inférieure.

11 - Si toutes les molécules d'un anneau de vapeurs continuaient de se condenser sans se désunir, elles formeraient à la longue un anneau liquide ou solide. Mais la régularité que cette formation exige dans toutes les parties de l'anneau et dans leur refroidissement a dû rendre ce phénomène extrêmement rare. Aussi le système solaire n'en offre-t-il qu'un seul exemple, celui des anneaux de Saturne. Presque toujours chaque anneau de vapeurs a dû se rompre en plusieurs masses qui, mues avec des vitesses très peu différentes, ont continué de circuler à la même distance autour du Soleil. Ces masses ont dû prendre une forme sphéroïdique, avec un mouvement de rotation dirigé dans le sens de leur révolution, puisque leurs molécules inférieures avaient moins de vitesse réelle que les supérieures ; elles ont donc formé autant de planètes à l'état de vapeurs. Mais si l'une d'elles a été assez puissante pour réunir successivement, par son attraction, toutes les autres autour de son centre, l'anneau de vapeurs aura été ainsi transformé dans une seule masse sphéroïdique de vapeurs, circulant autour du Soleil avec une rotation dirigée dans le sens de sa révolution. Ce dernier cas a été le plus commun. Cependant le système solaire nous offre le premier cas dans les quatre petites planètes qui se meuvent entre Jupiter et Mars, à moins qu'on ne suppose, avec M. Olbers, qu'elles formaient primitivement une seule planète qu'une forte explosion a divisée en plusieurs parties animées de vitesses différentes.

11 - Maintenant, si nous suivons les changements qu'un refroidissement ultérieur a dû produire dans les planètes en vapeurs dont nous venons de concevoir la formation, nous verrons naître au centre de chacune d'elles un noyau s'accroissant sans cesse par la condensation de l'atmosphère qui l'environne. Dans cet état, la planète ressemblait parfaitement au Soleil à l'état de nébuleuse, où nous venons de le considérer. Le refroidissement a donc dû produire, aux diverses limites de son atmosphère, des phénomènes semblables à ceux que nous avons décrits, c'est-à-dire des anneaux et des satellites circulant autour de son centre, dans le sens de son mouvement de rotation, et tournant dans le même sens sur eux-mêmes. La distribution régulière de la masse des anneaux de Saturne, autour de son centre et dans le plan de son équateur, résulte naturellement de cette hypothèse et, sans elle, devient inexplicable : ces anneaux me paraissent être des preuves toujours subsistantes de l'extension primitive de l'atmosphère de Saturne et de ses retraites successives. Ainsi les phénomènes singuliers du peu d'excentricité des orbites des planètes et des satellites, du peu d'inclinaison de ces orbites à l'équateur solaire, et de l'identité du sens des mouvements de rotation et de révolution de tous ces corps avec celui de la rotation du Soleil, découlent de l'hypothèse que nous proposons et lui donnent une grande vraisemblance qui peut encore être augmentée par la considération suivante :

13 - Tous les corps qui circulent autour d'une planète ayant été, suivant cette hypothèse, formés par les zones que son atmosphère a successivement abandonnées, et son mouvement de rotation étant devenu de plus en plus rapide, la durée de ce mouvement doit être moindre que celles de la révo-

lution de ces différents corps, ce qui a lieu semblablement pour le Soleil comparé aux planètes¹. Tout cela est confirmé par les observations. La durée de la révolution de l'anneau le plus voisin de Saturne est, suivant les observations d'Herschel, 0,438 j, et celle de la rotation de Saturne n'est que 0,427 j. La différence, 0,011 j, est peu considérable, comme cela doit être, parce que la partie de l'atmosphère de Saturne, que la diminution de la chaleur a déposée à la surface de cette planète, depuis la formation de l'anneau ayant été peu considérable, et venant d'une petite hauteur, elle a dû peu augmenter la rotation de la planète.

14 - 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.

15 - Dans notre hypothèse, les comètes sont étrangères au système planétaire. En les considérant, ainsi que nous l'avons fait, comme de petites nébuleuses errant de systèmes en systèmes solaires, et formées par la condensation de la matière nébuleuse répandue avec tant de profusion dans l'univers, on voit que lorsqu'elles parviennent dans la partie de l'espace où l'attraction du Soleil est prédominante, il les force à décrire des orbites elliptiques ou hyperboliques. Mais leurs vitesses étant également possibles suivant toutes les directions, elles doivent se mouvoir indifféremment dans tous les sens et sous toutes les inclinaisons à l'écliptique, ce qui est conforme à ce que l'on observe. Ainsi la condensation de la matière nébuleuse, par laquelle nous venons d'expliquer les mouvements de rotation et de révolution des planètes et des satellites dans le même sens et sur des plans peu différents, explique également pourquoi les mouvements des comètes s'écartent de cette loi générale.

16 - La grande excentricité des orbites cométaires est encore un résultat de notre hypothèse. Si ces orbites sont elliptiques, ils sont très allongés, puisque leurs grands axes sont au moins égaux au rayon de la sphère d'activité du Soleil. Mais ces orbites peuvent être hyperboliques, et si les axes de ces hyperboles ne sont pas très grands par rapport à la moyenne distance du Soleil à la Terre, le mouvement des comètes qui les décrivent, paraîtra sensiblement hyperbolique. Cependant, sur cent comètes au moins dont on a déjà les éléments, aucune n'a paru se mouvoir dans une hyperbole. Il faut donc que les chances qui donnent une hyperbole sensible soient extrêmement rares par rapport aux chances contraires. Les comètes sont si petites qu'elles ne deviennent visibles que lorsque leur distance périhélie est peu considérable. Jusqu'à présent, cette distance n'a surpassé que deux fois le diamètre de l'orbite Terrestre, et le plus souvent elle a été au-dessous du rayon de cet orbite. On conçoit que pour approcher si près du Soleil, leur vitesse au moment de leur entrée dans sa sphère d'activité doit avoir une grandeur et une direction comprises dans d'étroites limites. En déterminant par l'analyse des probabilités, le rapport des chances qui dans ces limites, donnent une hyperbole sensible, aux chances qui donnent un orbite que l'on puisse

confondre avec une parabole, j'ai trouvé qu'il y a six mille au moins à parier contre l'unité qu'une nébuleuse qui pénètre dans la sphère d'activité du Soleil, de manière à pouvoir être observée, décrira ou une ellipse très allongée, ou une hyperbole qui, par la grandeur de son axe, se confondra sensiblement avec une parabole, dans la partie que l'on observe : il n'est donc pas surprenant que, jusqu'ici, l'on n'ait point reconnu de mouvements hyperboliques.

17 - L'attraction des planètes et peut-être encore la résistance des milieux éthérés a dû changer plusieurs orbites cométaires dans des ellipses dont le grand axe est beaucoup moindre que le rayon de la sphère d'activité du Soleil. Ce changement peut encore résulter de la rencontre de ces astres, car il suit de notre hypothèse sur leur formation qu'il doit y en avoir un nombre prodigieux dans le système solaire, ceux qui s'approchent assez près du Soleil pouvant seuls être observés. On peut croire qu'un pareil changement a eu lieu pour l'orbite de la comète de 1759, dont le grand axe ne surpasse que trente-cinq fois, la distance du Soleil à la Terre. Un changement plus grand encore est arrivé aux orbites des comètes de 1770 et de 1805.

18 - Si quelques comètes ont pénétré dans les atmosphères du Soleil et des planètes au temps de leur formation, elles ont dû, en décrivant des spirales, tomber sur ces corps, et par leur chute, écarter les plans des orbites et des équateurs des planètes, du plan de l'équateur solaire.

19 - Si dans les zones abandonnées par l'atmosphère du Soleil il s'est trouvé des molécules trop volatiles pour s'unir entre elles ou aux planètes, elles doivent, en continuant de circuler autour de cet astre, offrir toutes les apparences de la lumière zodiacale, sans opposer de résistance sensible aux divers corps du système planétaire, soit à cause de leur extrême rareté, soit parce que leur mouvement est à fort peu près le même que celui des planètes qu'elles rencontrent.

20 - L'examen approfondi de toutes les circonstances de ce système accroît encore la probabilité de notre hypothèse. La fluidité primitive des planètes est clairement indiquée par l'aplatissement de leur figure, conforme aux lois de l'attraction mutuelle de leurs molécules. Elle est de plus prouvée pour la Terre par la diminution [sic] régulière de la pesanteur en allant de l'équateur aux pôles. Cet état de fluidité primitive auquel on est conduit par des phénomènes astronomiques, doit se manifester dans ceux que l'histoire naturelle nous présente. Mais pour l'y retrouver, il est nécessaire de prendre en considération l'immense variété des combinaisons formées par toutes les substances Terrestres mêlées dans l'état de vapeurs, lorsque l'abaissement de la température a permis à leurs éléments de s'unir. Il faut ensuite considérer les prodigieux changements que cet abaissement a dû successivement amener dans l'intérieur et à la surface de la Terre dans toutes ses productions, dans la constitution et la pression de l'atmosphère, dans l'Océan et dans les corps qu'il a tenus en dissolution. Enfin, il faut avoir égard aux changements brusques, tels que de grandes éruptions volcaniques, qui ont dû troubler à diverses époques la régularité de ces changements. La Géologie, suivie sous ce point de vue qui la rattache à l'Astronomie, pourra sur beaucoup d'objets, en acquérir la précision et la certitude.

21 - Un des phénomènes les plus singuliers du système

solaires est l'égalité rigoureuse que l'on observe entre les mouvements angulaires de rotation et de révolution de chaque satellite. Il y a l'infini contre un à parier qu'il n'est point l'effet du hasard. La théorie de la pesanteur universelle fait disparaître l'infini de cette invraisemblance, en nous montrant qu'il suffit, pour l'existence du phénomène, qu'à l'origine ces mouvements aient été très peu différents. Alors l'attraction de la planète a établi entre eux une parfaite égalité. Mais en même temps elle a donné naissance à une oscillation périodique dans l'axe du satellite, dirigé vers la planète, oscillation dont l'étendue dépend de la différence primitive des deux mouvements. Les observations de Mayer sur la libration de la Lune, et celles que MM. Bouvard et Nicollet viennent de faire sur le même objet, à ma prière, n'ayant point fait reconnaître cette oscillation, la différence dont elle dépend doit être très petite, ce qui indique avec une extrême vraisemblance une cause spéciale qui d'abord a renfermé cette différence dans les limites fort resserrées où l'attraction de la planète a pu établir entre les mouvements moyens de rotation et de révolution, une égalité rigoureuse, et qui ensuite a fini par détruire l'oscillation que cette égalité a fait naître. L'un et l'autre de ces effets résultent de notre hypothèse, car on conçoit que la Lune à l'état de vapeurs formait par l'attraction puissante de la Terre, un sphéroïde allongé dont le grand axe devait être dirigé sans cesse vers cette

planète, par la facilité avec laquelle les vapeurs cèdent aux plus petites forces qui les animent. L'attraction Terrestre continuant d'agir de la même manière, tant que la Lune a été dans un état fluide, a dû à la longue, en rapprochant sans cesse les deux mouvements de ce satellite, faire tomber leur différence dans les limites où commence à s'établir leur égalité rigou-

reuse. Ensuite cette attraction a dû anéantir peu à peu l'oscillation que cette égalité a produite dans le grand axe du sphéroïde, dirigé vers la Terre. C'est ainsi que les fluides qui recouvrent cette planète ont détruit, par leur frottement et par leur résistance, les oscillations primitives de son axe de rotation, qui maintenant n'est plus assujéti qu'à la nutation résultant des actions du Soleil et de la Lune. Il est facile de se convaincre que l'égalité des mouvements de rotation et de révolution des satellites a dû mettre obstacle à la formation d'anneaux et de satellites secondaires par les atmosphères de ces corps. Aussi l'observation n'a-t-elle jusqu'à présent rien indiqué de semblable.

22. Les mouvements des trois premiers satellites de Jupiter présentent un phénomène plus extraordinaire encore que le précédent, et qui consiste en ce que la longitude moyenne du premier, moins trois fois celle du second, plus deux fois celle du troisième, est constamment égale à deux angles droits. Il y a l'infini contre un à parier que cette égalité n'est point due au hasard. Mais on a vu que, pour la produire, il a suffi qu'à l'origine les moyens mouvements de ces trois corps

aient fort approché de satisfaire au rapport qui rend nul le moyen mouvement du premier, moins trois fois celui du second, plus deux fois celui du troisième. Alors leur attraction mutuelle a établi rigoureusement ce rapport et, de plus, elle a rendu constamment égale à la demi-circonférence la longitude moyenne du premier satellite, moins trois fois celle du second, plus deux fois celle du troisième. En même temps elle a donné naissance à une inégalité périodique qui dépend de la petite quantité dont les moyens mouvements s'écartaient primitivement du rapport que nous venons d'énoncer. Quelques soins que Delambre ait mis à reconnaître cette inégalité par les observations, il n'a pu y parvenir, ce qui prouve son extrême petitesse, et ce qui, par conséquent, indique avec une très grande vraisemblance une cause qui l'a fait disparaître. Dans notre hypothèse, les satellites de Jupiter, immédiatement après leur formation, ne se sont point mus dans un vide parfait : les molécules les moins condensables des atmosphères primitives du Soleil et de la planète formaient alors un milieu rare dont la résistance différente pour chacun de ces astres a pu approcher peu à peu leurs moyens mouvements, du rapport dont il s'agit. Et lorsque ces mouvements ont ainsi atteint les conditions requises pour que l'attraction mutuelle des trois satellites établisse ce rapport en rigueur, la même résistance a diminué sans cesse l'inégalité que ce rapport a

fait naître, et enfin l'a rendue insensible. On ne peut mieux comparer ces effets qu'au mouvement d'un pendule animé d'une grande vitesse dans un milieu très peu résistant. Il décrira d'abord un grand nombre de circonférences. Mais, à la longue, son mouvement de circulation toujours décroissant se changera dans un mou-

vement d'oscillation qui, diminuant lui-même de plus en plus, par la résistance du milieu, finira par s'anéantir : alors le pendule arrivé à l'état du repos, y restera sans cesse.

Notes :

1 - Kepler, dans son ouvrage "de motibus stellae Martis" a expliqué le mouvement de toutes les planètes dans un même sens, au moyen d'espèces immatérielles émanées de la surface du Soleil, et qui conservant le mouvement de rotation qu'elles avaient à la surface, impriment ce mouvement aux planètes. Il en a conclu que le Soleil tourne sur lui-même dans un temps moindre que celui de la révolution de Mercure, ce que Galilée reconnut bientôt après par l'observation.

L'hypothèse de Kepler est sans doute inadmissible, mais il est remarquable qu'il ait fait dépendre l'identité de la direction des mouvements planétaires de cette rotation du Soleil ; tant cette tendance paraît naturelle.

2 - Le tableau (p.31) est une toile de Krug (1853) exposée au musée Laplace à Beaumont en Auge