

doute aussi quelque peu, si le calcul était fondé non sur les inclinaisons des orbites, mais sur celles des grands axes. Toutefois, tel qu'il est, le résultat est assez clair : sans doute, en disant que les comètes sont 11 fois  $1/2$  plus abondantes au voisinage des pôles de l'écliptique qu'au voisinage de ce plan, on n'a peut-être qu'une grossière approximation de la vérité ; mais ce contraste frappant subsisterait vraisemblablement encore, sans grande altération, après toutes les corrections.

Maintenant, quel est le sens de ce fait ? Ce fait a plusieurs sens. Il renverse la supposition, admise par Laplace entre autres, et qui fait des comètes des corps jadis errants dans l'espace ou empruntés à d'autres systèmes, car alors il y a une infinité de chances contre une pour que les orbites de ces corps errants ne dussent avoir aucun rapport défini avec le plan du système solaire. Par la même raison, le même fait condamne l'hypothèse de Lagrange, qui a d'ailleurs d'autres côtés faibles, et qui fait naître les comètes de catastrophes planétaires, semblables à celle d'où seraient sorties, à ce qu'on croit, les astéroïdes. Ce fait nous prouve que les comètes ne sont pas des membres *accidentels* du système solaire, mais des membres *essentiels* ; qu'elles font partie intégrante de sa structure au même titre que les planètes. Si les comètes abondent autour de l'axe du système solaire et diminuent à l'approche de son plan de rotation, c'est que la formation des comètes a suivi une certaine *loi*, une loi qui n'est pas sans rapport avec la formation du système solaire.

Y a-t-il à cet arrangement quelque cause, de celles qu'on nomme causes finales ? Impossible d'en découvrir une : jusqu'au

jour où l'on aura trouvé aux comètes quelque utilité probable, on ne pourra par aucune raison montrer qu'elles devaient être distribuées comme elles le sont. Mais, si nous considérons la question à la manière du physicien, nous voyons que les comètes forment comme une antithèse aux planètes : d'abord par leur faible densité, leurs mouvements qui sont indifféremment directs ou rétrogrades, l'excentricité de leurs orbites, les directions variées de ces orbites ; ensuite, et plus évidemment encore par ce fait que, au lieu d'avoir, dans leur distribution, une tendance vers le plan de rotation de la nébuleuse, comme les planètes, elles ont une tendance vers l'axe<sup>1</sup>. Sans essayer de rendre compte de cette relation, on voit bien, par cela seul qu'elle existe, que les comètes sont nées par voie d'évolution ; et ce fait nous reporte à un temps auquel la matière dont est fait aujourd'hui le système solaire était épanchée jusqu'à ces lointaines régions de l'espace, où les comètes s'enfoncent.

Maintenant, voyez combien différemment les autres hypothèses se comportent en face de cette classe de phénomènes. Pour l'hypothèse généralement reçue, les comètes sont une pierre d'achoppement. Comment se fait-il qu'il existe des centaines (et probablement des milliers) de masses gazeuses d'une extrême rareté, roulant çà et là autour du soleil ? C'est ce qu'elle ne saurait expliquer. Rien n'est moins propre que cette hypothèse à rendre compte de leurs constitutions physiques, de

1. Un fait digne de remarque et qui donne à penser, c'est qu'il y a un rapport du même genre entre la distribution des nébuleuses et l'axe de la voie lactée où nous sommes. De même que les comètes sont abondantes autour des pôles de notre système solaire, et rares auprès de son plan de rotation, de même les nébuleuses abondent auprès des pôles de notre système stellaire et sont rares dans le voisinage de son équateur.

leurs mouvements variés et excentriques, ou de leur distribution. L'hypothèse de l'évolution, au contraire, non-seulement nous fournit cette réponse, applicable à toutes, qu'elles sont des produits secondaires du progrès du système ; elle nous permet encore une sorte d'explication de quelques particularités de détail.

Mais en voilà assez sur ces corps errants ; venons-en aux membres plus connus et plus importants du système solaire. L'harmonie frappante qui règne entre leurs mouvements à tous fut ce qui donna à Laplace la première idée de sa théorie : dès lors, il les vit naître tous par une seule et même genèse. Sir William Herschel, en observant les nébuleuses, avait été amené à concevoir les étoiles comme des amas condensés d'une matière diffuse ; de même Laplace, en observant la structure du système solaire, en vint à penser qu'un mouvement de rotation, imprimé à une matière en voie de condensation, pouvait seul en expliquer les particularités. Dans son *Exposition du système du monde*<sup>1</sup>, il dénombre comme il suit les principales raisons en faveur de cette théorie du développement : 1° les mouvements des planètes, qui se font dans la même direction et presque dans le même plan ; 2° les mouvements des satellites, dirigés comme ceux des planètes ; 3° la rotation de ces différents corps et du soleil, qui se fait dans la même direction que leurs révo-

1. L'*Exposition du système du monde*, où Laplace présente, en terminant, l'hypothèse de la nébuleuse, n'est que de 1796. Or, dès 1755, Kant, dans sa *Naturgeschichte des Himmels*, avait exposé la même théorie. Laplace n'a donc pas le mérite de la priorité. Toutefois il paraît bien avoir ignoré le livre de Kant, et, de plus, il a le premier donné à l'hypothèse un fondement mathématique. — L'histoire de cette découverte a été exposée d'une façon ingénieuse par M. O. Liebmann, *Zur Analysis der Wirklichkeit*, p. 353-361.

(TR.)

lutions et dans des plans peu différents ; 4° la faible excentricité des orbites des planètes et des satellites, opposée à l'excentricité considérable des orbites des comètes. Et il y avait, d'après ses calculs, deux cent mille milliards à parier contre un que ces mouvements harmoniques avaient une cause commune.

Cette probabilité si haute, remarquez-le, ne se rapporte pas à l'existence d'une cause commune telle qu'on l'entend ordinairement, d'une puissance invisible, agissant à la façon d'un « grand Ouvrier », mais bien à une puissance invisible dont le procédé se nomme évolution. Car, si les défenseurs de l'hypothèse vulgaire peuvent alléguer une raison de stabilité en faveur de la révolution des planètes dans un même sens et à peu près dans un même plan, ils ne peuvent expliquer de même l'identité de direction de tous les mouvements de rotation. L'équilibre mécanique du système n'aurait pas eu à souffrir, quand même le soleil n'aurait eu aucun mouvement de rotation, ni quand même il eût tourné sur son axe en sens inverse de la révolution des planètes, ou selon une direction perpendiculaire à leurs orbites. Il n'y aurait pas eu plus de danger à ce que la révolution de la Lune se fit en sens inverse de la rotation de la terre, ni à ce que le mouvement des satellites autour de Jupiter fût opposé au mouvement de Jupiter sur son axe, ni à ce qu'il en fût de même pour ceux de Saturne. Puis donc que nulle de ces possibilités n'a été réalisée, l'uniformité des faits exige, ici comme toujours, qu'on les rapporte à quelque loi générale qui les commande ; elle suppose ce qu'on nomme une causalité naturelle, c'est-à-dire l'opposé d'un arrangement arbitraire.

Ainsi l'hypothèse de l'évolution serait la seule probable, alors même que nous n'aurions pas de lumières sur le genre particulier d'évolution dont il s'agit. Mais quand un mathématicien dont l'autorité ne le cède à nulle autre vient nous offrir une théorie précise de cette évolution, qu'il fonde sur des lois mécaniques démontrées, et qui rend compte de ces divers détails, ainsi que de beaucoup d'autres faits secondaires, alors il est impossible de ne pas conclure que le système solaire s'est formé par évolution.

Il n'est guère nécessaire d'exposer les traits principaux de la théorie de Laplace. Les livres d'astronomie populaire ont rendu ses conceptions familières à la plupart des lecteurs ; on sait que, d'après lui, la matière aujourd'hui concentrée sous la forme du système solaire formait jadis un vaste sphéroïde tournant sur son axe, très-peu dense, et dont le rayon surpassait celui de l'orbite de Neptune ; à mesure que le sphéroïde se contractait, sa vitesse de rotation croissait par le fait même ; la force centrifuge augmentant ainsi, la zone équatoriale se trouvait de temps en temps dans l'impossibilité de suivre davantage la masse en voie de condensation, restait alors en arrière, et donnait un anneau en révolution ; chacun des anneaux tournants, ainsi détachés à diverses époques, finissait par se rompre en son point le plus faible, se ramassait sur lui-même, et par degrés se formait en une masse animée d'un mouvement rotatoire ; cette masse, comme la masse-mère, acquérait une rotation plus vive à mesure que son volume décroissait, laissait à son tour des anneaux, qui enfin tombaient à l'état de sphéroïdes en rotation ; et ainsi de

ces anneaux primaires et secondaires sortaient planètes et satellites, tandis que de la masse centrale naissait le soleil. On sait également assez que cette déduction *a priori* s'accorde avec les résultats de l'expérience. Le docteur Plateau <sup>1</sup> a fait voir qu'une masse fluide, protégée autant que possible contre l'action des forces extérieures, et à laquelle on imprime une rotation de vitesse suffisante, donne des anneaux indépendants ; que ces anneaux se rompant forment des sphéroïdes qui tournent sur leurs axes dans la même direction que la masse centrale. Ainsi, soit donnée une nébuleuse primitive, animée d'un mouvement gyroïde, lui-même acquis comme nous l'avons déjà dit, et qui à la longue s'est condensée en un vaste sphéroïde gazeux tournant sur son axe ; et, avec cette donnée, les principes de la mécanique font le reste. On peut prédire la formation d'un système solaire, animé de mouvements pareils à ceux qu'on observe dans le nôtre ; et le raisonnement qui appuie cette prédiction est confirmé par l'expérience <sup>2</sup>.

1. Voici, en ce qu'elle a d'essentiel, l'expérience de M. Plateau : — Étant donné un vase plein d'eau, au milieu de cette eau on introduit, avec une pipette, une petite quantité d'un mélange d'huile lourde et d'huile légère, dont la quantité est exactement 1. Ce mélange a été d'avance coloré. Placé dans l'eau, il se trouve dans la condition d'un corps soustrait à toute attraction extérieure. Or, on le voit aussitôt prendre la forme d'une sphère. Si par le centre de cette sphère on fait passer un axe mince de métal, et qu'on imprime à cet axe un mouvement de rotation, ce mouvement se communique à la masse d'huile, qui ainsi représente un corps libre dans l'espace, tournant sur lui-même. Alors, on la voit peu à peu s'aplatir aux pôles, se renfler à l'équateur ; puis la zone équatoriale se détache, forme un anneau, etc. : en un mot, on assiste là à un spectacle fort semblable à celui que présente, suivant Laplace, une nébuleuse en voie de condensation.

(TR.)

2. A vrai dire, sous la forme que Laplace leur a donnée, ces propositions ne sont pas à l'abri de toute critique. Un astronome de la plus grave autorité, qui a eu le bonté de m'adresser quelques objections sur cet essai, affirme que, au lieu d'un anneau nébuleux se rompant en un seul point et se ramassant en une

Voyons maintenant si, outre ces caractères, les plus marquants de ceux qu'offre le système solaire, il n'y en aurait pas d'autres, secondaires, et qui s'expliqueraient de même. Commençons par le rapport qu'il y a entre les plans des orbites planétaires et le plan de l'équateur du soleil. Si, au temps où la nébuleuse dépassait l'orbite de Neptune, toutes ses parties avaient exécuté leur révolution dans un même plan, ou plutôt dans des plans parallèles, si toutes avaient eu un seul et même axe, alors les plans des anneaux successivement détachés auraient tous coïncidé ensemble et avec le plan de rotation du soleil. Mais il suffit de remonter aux âges primitifs de la concentration pour voir qu'il ne pouvait y avoir alors rien de pareil à un mouvement tout à fait uniforme de l'ensemble. Les flocons qui, nous l'avons déjà fait voir, formaient un précipité au milieu d'une nébuleuse irrégulière et prodigieusement dilatée, et qui se dirigeaient de toutes parts vers leur centre commun de gravité, devaient se mouvoir non dans un plan, mais dans une infinité de plans, se coupant entre eux sous tous les angles possibles.

Peu à peu s'établit un mouvement gyrotoire, dont nous avons déjà prévu la production, et semblable à celui dont nous voyons aujourd'hui les indices dans les nébuleuses spirales :

masse unique, il y a toutes chances pour que l'anneau se brise en plusieurs masses. Cette hypothèse semble certainement plus probable. Mais admettons qu'un anneau nébuleux se rompe en plusieurs morceaux : on pourra encore, comme il y a à parier une infinité contre un qu'ils ne seront ni équivalents ni équidistants, soutenir qu'ils ne sauraient demeurer ainsi distribués tout autour de l'orbite commune : cette chaîne annulaire de masses gazeuses se réduira à plusieurs groupes de masses; ces groupes finiront par s'unir en groupes plus vastes; et enfin le résultat sera la formation d'une masse unique. J'ai interrogé là-dessus un astronome qui en autorité ne le cède guère au précédent, et il a convenu avec moi que telle serait probablement la marche des choses.

c'est un premier pas vers le mouvement dans un seul plan, le plan du plus grand moment. Mais ce plan ne peut se fixer que lentement. Les flocons qui ne se meuvent pas dans ce plan, et qui viennent s'unir au tout, sous tous les angles imaginables, tendront à achever leurs révolutions autour du centre commun en persévérant dans leurs plans propres; c'est seulement à la longue que leurs mouvements seront en partie détruits par des mouvements contraires, en partie absorbés dans le mouvement de l'ensemble. C'est surtout les parties les plus extérieures de la masse tournante qui garderont longtemps leurs directions plus ou moins indépendantes, car il n'y aura là ni frottement ni attraction du centre assez énergiques pour les gêner beaucoup. Il est donc probable que les anneaux détachés en premier lieu s'éloigneront beaucoup du plan moyen du système, et que les derniers détachés s'en éloigneront peu. Ici encore, l'expérience confirme en une large mesure la théorie. La progression sans doute n'est pas régulière, mais en moyenne les inclinaisons décroissent à mesure qu'on approche du soleil.

Maintenant, considérons le mouvement des planètes sur leurs axes. C'était, aux yeux de Laplace, une preuve de la communauté d'origine des planètes, que le sens de leur rotation (il est le même que celui de leur révolution autour du soleil) et la situation de leurs axes (à peu près perpendiculaires sur leurs orbites). Depuis Laplace, on a découvert une exception à cette règle générale, et une seconde plus récemment encore; elles concernent l'une Uranus, l'autre Neptune, du moins en ce qui regarde les mouvements de leurs satellites. Cette anomalie a paru à plusieurs porter une grave atteinte à la probabilité

de la théorie, et à première vue ce jugement paraît vrai. Mais, en y réfléchissant un peu, on va voir, je l'espère, que cette anomalie n'a rien d'inexplicable; seulement Laplace est allé trop loin en regardant comme un des résultats inévitables de l'évolution d'une nébuleuse ce qui n'en est, en de certains cas, qu'un accompagnement probable. La cause déterminante du sens de la rotation était, selon lui, la supériorité de la vitesse absolue des parties extérieures de l'anneau détaché. Mais il y a telles circonstances où cette différence de vitesse peut être négligeable ou même nulle, et telles autres où, bien qu'importante, elle ne suffira pas à déterminer le sens de la rotation.

Premier point à noter : les différentes couches d'un sphéroïde nébuleux en voie de concentration, en vertu de leur origine, ne pourront guère se mouvoir avec une seule et même vitesse angulaire; il faudrait, pour égaliser leurs vitesses, un frottement prolongé pendant un temps indéfini, et c'est surtout les couches les plus extérieures qui devront conserver le plus longtemps leur mouvement particulier : nous venons d'en dire les raisons. Il se peut donc que, dans les anneaux les premiers détachés, les rebords extérieurs n'aient pas une vitesse absolue supérieure à celle du reste; les planètes qui en naîtront auront alors une rotation rétrograde. En outre, il faut tenir compte de la coupe de l'anneau, et cette coupe peut différer plus ou moins d'un cas à l'autre. Mais ici, pour être clair, il me faut recourir à un exemple. Prenons une orange : le calice et le pétiole nous figureront les pôles; enlevons une bande de peau selon l'équateur; plaçons sur une table cette bande, en en re-

joignant les bouts : elle formera un anneau comparable à un cercle de tonneau, cet anneau ayant une épaisseur très-faible dans le sens de son diamètre, mais une largeur considérable dans le sens de la perpendiculaire à son diamètre. Maintenant, au lieu d'une orange, qui est un sphéroïde à peine aplati, prenons un sphéroïde très-aplati, à peu près pareil à une lentille d'une faible convexité. Si, sur le rebord ou équateur de ce sphéroïde lenticulaire, on découpait un anneau de médiocre volume, il différerait du précédent en ce qu'il aurait sa plus grande épaisseur dans le sens du diamètre et non dans le sens perpendiculaire; ce serait un anneau assez comparable à un disque, mais beaucoup plus mince. Ainsi donc, selon le degré d'aplatissement d'un sphéroïde en rotation, l'anneau qui s'en détachera aura la forme d'un cerceau ou celle d'un disque.

Autre fait à noter : dans un sphéroïde très-plat, ou lenticulaire, l'anneau changera de forme selon son volume. Un anneau très-mince, formé de la seule superficie de l'équateur, ressemblera à un cerceau; un anneau d'une masse notable, mordant jusqu'à une certaine profondeur sur le diamètre du sphéroïde, sera de forme discoïde. Ainsi, selon l'aplatissement du sphéroïde et le volume de l'anneau détaché, cet anneau aura sa plus grande épaisseur dans le sens de son plan ou dans le sens perpendiculaire. Or cette circonstance aura une action marquée sur la rotation de la planète qui doit en naître. Dans un anneau nébuleux qui aura bien nettement la forme d'un cerceau, les différences de vitesse entre la surface interne et l'extérieur seront très-faibles; et un tel anneau, venant à se ramasser en une masse dont le plus grand dia-

mètre est à angle droit avec le plan de l'orbite, communiquera presque sûrement à cette masse une tendance prédominante à exécuter sa rotation dans un sens perpendiculaire au plan de l'orbite. Si l'anneau n'a pas une forme aussi marquée de cerceau, alors la différence de vitesse entre le dedans et le dehors sera plus forte, et les forces contraires, l'une qui tend à déterminer la rotation dans le plan de l'orbite, et l'autre dans le plan perpendiculaire, s'exerceront simultanément; et le plan de rotation adopté sera intermédiaire. Enfin, si l'anneau nébuleux est bien nettement discoïde, et s'il se ramasse en un corps ayant sa plus grande dimension dans le plan de l'orbite, les deux forces tendront d'ensemble à déterminer la rotation dans ce même plan.

Jetons un regard sur les faits : nous les trouverons, dans la mesure où ils sont accessibles, d'accord avec notre idée. A voir l'immense rayon de l'orbite d'Uranus, et sa masse, qui par comparaison est petite, on peut croire que l'anneau d'où il naquit était mince et par suite avait la forme d'un cerceau, surtout si, comme on a lieu de le penser, la masse nébuleuse était, à cette époque-là, moins aplatie que plus tard. Donc, son plan de rotation dut être presque perpendiculaire sur son orbite, et le sens de la rotation n'avait aucun rapport avec celui de la révolution. Saturne a une masse sept fois aussi grande et une orbite d'un diamètre moitié moindre; c'est que son anneau originaire, ayant une circonférence au moins deux fois moindre, et une épaisseur verticale de moitié au moins plus petite (car le sphéroïde alors était *aussi* aplati et même *plus* aplati), a dû être considérablement plus large, moins en

forme de cerceau, plus rapproché de la forme discoïde; malgré la différence de densité, il dut avoir une épaisseur au moins double ou triple, mesurée selon le plan de son diamètre. Aussi Saturne a-t-il sa rotation dirigée dans le même sens que sa translation, et dans un plan qui s'écarte de trente degrés seulement de l'autre.

Quant à Jupiter, dont la masse est trois fois et demie celle de Saturne et dont l'orbite est un peu plus de la moitié de la précédente, l'anneau primitif doit, pour les mêmes raisons, être plus large encore, et nous pouvons dire tout à fait discoïde; de là une planète dont le plan de rotation ne s'écarte guère que de trois degrés du plan de l'orbite. Enfin, si l'on considère la petitesse relative de Mars, de la Terre, de Vénus et de Mercure, comme la diminution du rayon des anneaux ne suffit pas à expliquer la petitesse des masses qui en sortent, il faut donc que ces anneaux aient été minces, et qu'ils se soient rapprochés de nouveau de la forme du cerceau; et c'est pour cela que les plans de rotation s'écartent de nouveau sensiblement, quoique plus ou moins, de ceux des orbites. Si l'on tient compte de l'aplatissement progressif du sphéroïde primitif aux divers moments de la condensation, et de la masse plus ou moins grande des anneaux détachés, il nous semble que les divers mouvements de rotation des différents corps sont loin de contredire notre hypothèse.

Ce n'est pas seulement le sens, mais aussi la vitesse de la rotation, qui s'explique par là. Il serait naturel de supposer que les grosses planètes tourneront sur elles-mêmes avec plus de lenteur que les petites : c'est ce que nos expériences à la

surface de la terre nous portent à croire. Eh bien! c'est un corollaire de l'hypothèse de la nébuleuse, surtout entendue comme nous l'avons dit, que les grosses planètes doivent avoir une rotation rapide, et les petites l'avoir lente. C'est ce que l'observation vérifie. Toutes choses égales d'ailleurs, une masse nébuleuse en voie de concentration, qui occupe un vaste espace, et dont les parties extérieures ont par suite à parcourir un long chemin pour arriver à leur centre de gravité commun, doit acquérir une vitesse de rotation considérable au cours de sa condensation; et c'est le contraire pour une faible masse. La différence doit s'accroître encore quand la forme de l'anneau primitif contribue encore à accroître la vitesse de rotation. Toutes choses égales d'ailleurs, un anneau primitif qui a sa plus grande épaisseur dans la direction de son rayon produira une masse dont la vitesse de rotation dépassera celle d'une masse sortie d'un anneau qui a sa plus grande épaisseur dans le sens vertical; et si l'anneau est épais non-seulement par comparaison, mais absolument parlant, la rotation sera très-rapide. Ces conditions, nous l'avons vu, ont été remplies en ce qui concerne Jupiter, et Jupiter roule sur son axe en moins de dix heures. Saturne, en qui ne se sont pas aussi bien rencontrées les conditions favorables à une rotation rapide, y met dix heures et demie. Au contraire, Mars, la Terre, Vénus et Mercure, dont les anneaux doivent avoir été minces, ont besoin de plus du double de ce temps; et les plus petites sont les plus lentes.

Des planètes, arrivons aux satellites. Ici, il y a d'abord les faits remarquables que l'on signale d'ordinaire : ils accom-

plissent leur révolution dans le même sens que leur rotation, dans des plans qui s'écartent peu de leur équateur et dans des orbites presque circulaires; mais, en outre, il y a plusieurs traits significatifs qu'il ne faut pas omettre.

En voici un d'abord : c'est que chaque groupe de satellites offre une miniature du groupement des planètes autour du soleil, d'abord pour les particularités susdites, puis quant à l'ordre de grandeur. Quand on va dans le système solaire du dehors au centre, on rencontre quatre grandes planètes extérieures, et puis quatre intérieures qui sont relativement petites. Même contraste entre les satellites intérieurs et extérieurs de chaque planète. Les quatre satellites de Jupiter observent entre eux cet ordre, autant que le permet leur petit nombre; les deux du dehors sont les plus grands, et les deux du dedans les plus petits. D'après les plus récentes observations de M. Lassell, il en est de même des quatre satellites d'Uranus. Pour Saturne, qui a huit planètes secondaires tournant autour de lui, la ressemblance est plus frappante encore, tant pour l'arrangement que pour le nombre : les trois satellites extérieurs sont gros, ceux du dedans sont petits; et, quant à leurs grandeurs, les différences sont ici bien plus marquées : le plus gros égale presque Mars, et le plus petit se laisse à peine voir dans les meilleurs télescopes.

D'ailleurs, l'analogie ne s'arrête pas là. De même que, pour les planètes, il y a d'abord progression dans la grandeur, quand on s'avance de Neptune, et d'Uranus qui n'en diffère guère, à Saturne, qui est beaucoup plus gros, et à Jupiter, le plus énorme de tous; de même, pour les huit satellites de