

faveur de l'une ou l'autre de ces deux théories. Toutes deux sont sujettes à des difficultés inhérentes à l'hypothèse nébulaire elle-même et à la conception de l'état primitif des planètes sous forme d'anneaux.

L'examen mathématique des conditions de formation et de durée de ces anneaux, aussi bien que de celles de leur dislocation, pourrait nous éclairer sur la possibilité mécanique de l'existence de pareils systèmes, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de la nébuleuse. Les essais tentés dans cette voie ont conduit, il est vrai, à des résultats assez contradictoires; mais ces contradictions semblent tenir aux divergences mêmes des données du problème que les divers auteurs se sont proposé de résoudre. Une étude mécanique absolument générale des conditions d'existence de la nébuleuse et des transformations qu'elle peut subir serait indispensable pour donner à l'hypothèse nébulaire une base plus solide que les raisonnements assez vagues sur lesquels elle repose aujourd'hui. Mais une pareille analyse semble dépasser encore de beaucoup les forces de la Science; et nous serons réduits encore longtemps à présenter les hypothèses cosmogoniques, comme l'ont fait leurs illustres auteurs, « avec la défiance que doit inspirer tout ce qui n'est pas un résultat de l'observation ou du calcul. »

CHAPITRE VI.

RECHERCHES DE M. G. DARWIN.

Dans les hypothèses cosmogoniques que nous avons examinées, l'état du système planétaire est supposé constant : les planètes se sont formées aux distances auxquelles elles sont actuellement du Soleil, les satellites décrivent les mêmes orbites qu'ils décrivaient à l'origine. La stabilité est le caractère de cette création; telle elle est née, telle elle subsiste et subsistera. M. Faye a bien admis sans doute que les anneaux qui ont formé les planètes pouvaient être à des distances du Soleil plus grandes que les rayons moyens des orbites actuelles. « Les planètes intérieures à l'orbite d'Uranus se sont rapprochées du Soleil en même temps que leurs satellites s'éloignaient un peu d'elles » (1). Mais un tel changement ne s'est produit qu'à l'origine, et dans l'avenir, le Soleil pourra dissiper toute son énergie et s'éteindre, la vie disparaître de la surface des planètes : « Quant au système lui-même, les planètes obscures et froides continueront à circuler autour du Soleil éteint (2). »

« Les mouvements purement astronomiques du système continueront indéfiniment » (3). Ce n'est que dans les mouvements de rotation, en dehors de ce déplacement primitif et passager, que nous avons constaté de réels changements depuis la formation de chaque nébuleuse individuelle jusqu'au complet achèvement de l'astre auquel elle a donné naissance. Nous avons trouvé la cause de ces changements dans l'action des marées produites au sein de la nébuleuse satellite par l'attraction du corps central; et il en est ressorti des conséquences de la plus haute importance : je rappellerai l'établissement forcé d'un mouvement de rotation direct des

(1) *Sur l'origine du monde*, p. 193.

(2) *Ibidem*, p. 253.

(3) *Ibidem*, p. 255.

planètes, quel qu'ait pu être le sens primitif de la rotation de la nébuleuse planétaire. Laplace le premier avait invoqué de telles marées dans le sphéroïde lunaire pour expliquer l'égalité rigoureuse des mouvements angulaires de rotation et de révolution de notre satellite.

Une action si puissante à l'origine a-t-elle complètement cessé? Son action s'est-elle bornée à influencer la durée des mouvements de rotation? Si elle existe encore aujourd'hui, dans quelles limites est-elle capable de modifier l'état actuel du système planétaire? Toutes ces questions intéressent au plus haut degré la doctrine cosmogonique considérée, ainsi que je l'ai définie en commençant, comme embrassant l'origine et l'état futur et final du monde. L'introduction de la Thermodynamique dans la Science a déjà fait entrevoir la possibilité d'en trouver la solution. Je vais essayer de résumer brièvement les résultats acquis et les vues nouvelles qu'ils ouvrent sur l'origine de certains astres.

C'est le problème de l'accélération séculaire du moyen mouvement de la Lune qui a rappelé l'attention des Astronomes sur l'influence des marées. Laplace avait fait remarquer qu'il suffirait pour expliquer cette accélération, dont la valeur est environ $12''$ par siècle, d'admettre un ralentissement de la rotation de la Terre. Mais, ayant cru trouver d'autre part que la variation d'excentricité de l'orbite terrestre expliquait entièrement cette accélération et même lui assignait la valeur trouvée par l'observation, il en conclut : 1° que la Lune et la Terre n'ont pas toujours marché l'une vers l'autre en se rapprochant, mais que ce mouvement est périodique; 2° que la durée du jour sidéral n'a pas varié d'un centième de seconde depuis le temps d'Hipparque. Plus tard, M. Adams en 1853 et Delaunay en 1864, firent voir qu'en réalité la quantité dont la variation d'excentricité de l'orbite terrestre fait varier le mouvement de la Lune n'atteint que $6''$, 1, résultat confirmé depuis par les travaux de MM. Victor et Pierre Puiseux. Il fallait expliquer les $6''$ restantes.

C'est alors que Delaunay, reprenant l'idée première de Laplace, y vit la preuve d'un ralentissement réel de la vitesse de rotation de la Terre, qu'il attribua à l'action des marées, la viscosité et le frottement de l'Océan agissant sur le noyau solide à la manière d'un frein. On se rappelle les discussions d'un très haut intérêt que fit

naître l'énoncé de cette opinion à l'Académie des Sciences de Paris et à la Société royale Astronomique de Londres. S'il y a action retardatrice de la Lune sur la Terre par l'intermédiaire des marées, une réaction doit s'ensuivre, comme le faisaient remarquer M. J. Bertrand et M. G. Darwin; de là un ralentissement du moyen mouvement de la Lune et un accroissement de sa distance à la Terre, effet directement opposé à celui qu'il s'agissait d'expliquer. Mais d'après Delaunay, dont M. Airy soutenait l'opinion, le coefficient du retard imprimé à la Lune est moindre que celui du retard de la rotation de la Terre (1).

La question ainsi posée n'a pas encore aujourd'hui reçu de solution définitive. Mais elle a été l'origine d'importants travaux de M. W. Thomson et de M. G.-H. Darwin sur la théorie générale des marées. J'ai déjà indiqué les faits nouveaux signalés par M. Darwin relativement à l'obliquité des axes de rotation des planètes. Il me reste à faire connaître la partie de son travail qui a trait plus particulièrement à la Cosmogonie. L'ensemble de ses recherches forme six Mémoires présentés à la Société royale de Londres de 1879 à 1882 (2).

M. G. Darwin a l'excellente habitude de joindre à chacun de ses Mémoires un résumé en langage ordinaire des résultats auxquels

(1) M. W. Thomson a plus tard appelé l'attention sur une autre cause perturbatrice du mouvement de rotation de la Terre : c'est la chute incessante des poussières météoriques sur sa surface, qui augmentent le moment d'inertie et par suite ralentissent la rotation (*Glasgow Geological Society*, vol. III : *On Geological Time*). Une autre cause, l'action du Soleil sur l'onde que produit dans l'atmosphère la variation diurne de la température, détermine au contraire une légère accélération du mouvement de rotation de la Terre. [W. THOMSON, *Accélération thermodynamique du mouvement de rotation de la Terre* (*Séances de la Société française de Physique*, 1881, p. 200. *Royal Soc. of Edinburg*, 1881-82, p. 396).]

(2) *On the bodily tides of viscous and semi-elastic spheroids...* (*Phil. Transactions*, 1879, part I). — *On the precession of a viscous spheroid and on the remote history of the Earth* (1879, part II). — *Problems connected with the tides of a viscous spheroid* (1879, part II). — *On secular changes in the elements of the orbit of a satellite revolving about a tidally distorted Planet* (1880, part II). — *On the tidal friction of a Planet attended by several satellites and on the evolution of the solar system* (1881, part II). — *On the stresses caused in the interior of the Earth by the weights of continents and mountains* (1882, part I). Des analyses détaillées de ces Mémoires ont été données dans les *Proceedings of the R. Society*.

l'ont conduit ses déductions mathématiques. J'emprunte l'exposé de sa théorie à ces résumés, et particulièrement à ceux des Mémoires intitulés : *Changements séculaires des éléments de l'orbite d'un satellite tournant autour d'une planète déformée par les marées*, et *Du frottement de la marée sur une planète entourée de plusieurs satellites*.

Le point fondamental de la théorie est la transformation de la quantité de mouvement de rotation d'une planète, à mesure qu'il est détruit par le frottement des marées, en quantité de mouvement orbital du corps qui produit la marée.

La marée que considère M. Darwin n'est pas seulement celle que soulève l'action d'un corps extérieur dans la couche de liquide dont est recouverte la planète, mais celle qui affecte la masse entière de cette planète, qui n'est point absolument rigide, mais plus ou moins visqueuse et par conséquent déformable. Même dans son état actuel, la Terre n'échappe point à de telles déformations : il faudrait lui supposer une rigidité plus grande que celle de l'acier pour qu'il n'en fût pas ainsi. A plus forte raison, dans les périodes antérieures de son histoire, la Terre primitivement fluide a-t-elle dû subir des marées dans toute sa masse (*bodily tides*), dont les frottements ont produit sur sa rotation des effets bien plus énergiques que ceux que l'on peut attribuer aujourd'hui au frottement de la masse liquide de l'Océan sur la croûte solide du globe ⁽¹⁾. Examinons l'action de ce frottement de la marée sur la planète, et la réaction qui en résulte sur le satellite auquel est due la marée.

Si nous supposons la Terre et la Lune seules en présence, et la Terre tournant sur elle-même dans un temps plus court que la période de révolution de la Lune, l'effet de la marée lunaire sera de retarder le mouvement de rotation de la Terre, et de tendre à égaliser les périodes de la rotation de la Terre autour de son axe, et de la révolution des deux corps autour de leur centre d'inertie; aussi longtemps en effet que ces périodes diffèrent, l'action de la Lune sur la protubérance soulevée et entraînée par le mouvement trop rapide de rotation de la Terre tend à ramener celle-ci en arrière. Si,

⁽¹⁾ Bien que M. Darwin ait basé ses recherches sur le frottement dû à cette *marée corporelle*, il fait néanmoins remarquer qu'on arriverait aux mêmes résultats par la considération de la seule marée superficielle ou d'une combinaison de celle-ci avec la marée interne.

pour plus de simplicité, nous supposons que la Lune est un corps sphérique homogène, l'action mutuelle et la réaction de la gravitation entre sa masse et celle de la Terre seront équivalentes à une force unique passant par son centre, et appliquée à un point de la Terre situé en dehors du centre, dans une position telle que l'action dirigée de la Terre vers la Lune ait un moment opposé au moment de rotation de la Terre. La réaction sur la Lune, dirigée suivant la même ligne, peut être regardée comme la résultante d'une force dirigée suivant la ligne des centres et presque égale à la force entière, et d'une force comparativement très petite perpendiculaire à la ligne des centres, tangentielle à fort peu près à l'orbite lunaire et dirigée dans le sens du mouvement du satellite. Une telle force aurait pour effet initial d'accroître la vitesse de la Lune; mais, après un certain temps, la Lune se sera éloignée de la Terre en vertu de cette accélération, jusqu'à ce qu'elle ait perdu, en se mouvant en sens contraire de l'attraction terrestre, autant de vitesse qu'elle en avait gagné par l'action de la force accélératrice. L'effet de cette force tangentielle continue sera donc d'accroître graduellement la distance du satellite au corps central, et de faire que le mouvement de ce satellite s'exécute sur une orbite en spirale s'ouvrant très lentement en dehors. Dans cette transformation lente des deux mouvements de la Terre et de la Lune, l'accroissement du moment de la quantité de mouvement des centres d'inertie de la Lune et de la Terre, par rapport à leur centre commun d'inertie, est égal à la diminution de la quantité de mouvement de rotation de la Terre. Et les choses continueraient ainsi jusqu'à ce que la Terre et la Lune fussent amenées à tourner toutes deux comme un corps rigide unique autour de leur centre commun d'inertie, en se regardant toujours par les mêmes faces.

Mais si, au lieu de prévoir ce que l'action des marées produira dans l'avenir, nous remontons le cours des siècles en arrière, nous verrons la Lune dans des positions de plus en plus rapprochées de la Terre, dont la rotation était beaucoup plus rapide qu'elle ne l'est aujourd'hui; et nous arriverons, avec M. G. Darwin, à une époque où la Lune, presque en contact avec la Terre, tournait autour d'elle en un temps un peu plus long que la période de rotation de celle-ci, qui était réduite à une durée beaucoup plus petite (5 heures environ) que sa durée actuelle.

Il fut donc un temps où la Terre et la Lune ne faisaient qu'un corps unique, tournant sur lui-même avec une très grande rapidité. Il semble dès lors légitime et naturel de considérer l'état primitif de la Terre, avant la formation de la Lune, comme celui d'un globe en partie solide, en partie fluide et même gazeux. Ce globe tournait autour d'un axe très peu incliné sur l'écliptique, dans une période de une à quatre heures, et faisait sa révolution autour du Soleil dans une période à peine plus courte que l'année actuelle. La rapidité de la rotation devait déterminer un tel aplatissement, que la figure ellipsoïdale devait être très peu stable; et il a suffi peut-être de la marée produite sur cette planète par le Soleil pour en déterminer la séparation en deux masses, dont la plus grande est devenue la Terre, la plus petite la Lune. La déformation provenant de cette marée a pu, en effet, à une certaine époque, devenir énorme, s'il est arrivé, en vertu de la rapidité de la rotation, que la période de la marée ait été la même que celle de l'oscillation élastique du globe fluide. La forme primitive du satellite a-t-elle été un anneau continu, ou un essaim de météorites, ou bien l'ellipsoïde primitif a-t-il donné immédiatement naissance à deux globes? C'est une question que l'état de nos connaissances sur les conditions de stabilité et de rupture d'une masse fluide en rotation ne permet pas de résoudre.

Mais à partir du moment où la Lune a pris naissance, presque en contact avec la Terre et tournant avec elle presque comme un ensemble rigide, M. Darwin croit possible de suivre mathématiquement les phases successives par lesquelles a passé le système des deux corps pour arriver à l'état actuel.

Comme les deux masses ne sont pas rigides, l'attraction de chacune d'elles déforme l'autre; et si elles ne tournent pas rigoureusement dans le même temps, chacune produit des marées sur l'autre. Le Soleil aussi produit des marées sur les deux. Par suite de la résistance de frottement que la viscosité des deux masses offre aux mouvements de ces marées, un tel système est dynamiquement instable. Si, aux premiers jours de sa naissance, la Lune s'était mue sur son orbite plus vite que la Terre ne tourne, elle serait retombée sur la Terre. Ainsi l'existence de la Lune nous force à croire qu'au moment de la rupture, la durée de la révolution de la Lune était un peu plus grande que celle de la

rotation de la Terre. C'est aussi la conclusion à laquelle semble conduire le principe de la conservation des moments des quantités de mouvement.

Par suite du frottement des marées, la durée de la période de la Lune, ou le mois, s'allonge, et celle de la rotation de la Terre, le jour, s'accroît aussi; mais le mois s'allonge beaucoup plus vite que le jour. En même temps, la Lune tournait autour d'un axe à peu près parallèle à celui de la Terre. Mais l'attraction de la Terre sur les marées soulevées sur la Lune tendait à ralentir ce mouvement de rotation, et ce ralentissement est bien plus rapide que le ralentissement analogue de la rotation de la Terre. A partir du moment où la rotation de la Lune sur son axe atteint une vitesse angulaire qui n'est plus que le double de la vitesse angulaire sur l'orbite, la position de son axe de rotation, jusque-là parallèle à l'axe de la Terre, devient dynamiquement instable. L'obliquité de l'équateur lunaire sur le plan de l'orbite augmente, atteint un maximum et diminue ensuite. En même temps, la période de la rotation lunaire augmente toujours, et finalement, l'équateur de la Lune coïncide à fort peu près avec le plan de son orbite, en même temps que la marée dégénère en une déformation permanente de l'équateur lunaire, qui fait que la Lune tourne toujours la même face vers la Terre. C'est aussi le résultat auquel est arrivé Laplace.

En même temps, l'orbite lunaire changeait aussi de forme et de position. A mesure que le mois augmente en longueur, l'orbite lunaire devient excentrique, et l'excentricité atteint un maximum lorsque la durée du mois est d'environ une rotation et demie de la Terre. Ensuite l'excentricité diminue. Plus tard encore, lorsque la Terre est devenue plus rigide, et que les océans se sont formés, le frottement de la marée océanique commence à jouer un rôle plus important que celui de la marée du globe entier. Alors l'excentricité recommence à croître, après avoir passé par un état stationnaire. Le plan de l'orbite est d'abord nécessairement identique avec l'équateur terrestre; mais à mesure que la Lune s'éloigne de la Terre, l'attraction du Soleil commence à faire sentir son action. Au moment de la genèse de la Lune, l'équateur terrestre devait être incliné de 4° à 12° sur l'écliptique, nous dirons plus tard la cause probable de cette obliquité; l'orbite lunaire était dans le plan de l'équateur. M. Darwin introduit ici la considération de deux plans