

C. Wolf - Les Recherches de M. G. Darwin.

(Les Hypothèses Cosmogoniques, Paris 1886, p. 76-91.)

mm

..... C'est le problème de l'accélération séculaire du moyen mouvement de la lune qui a appelé 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 eu 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 le quantum dont la variation d'excentricité de l'orbite terrestre fait varier le mouvement de la lune n'atteint que $5'',1$, résultat confirmé depuis par les travaux de M. M. Victor et René Poincaré. Il fallait expliquer les $5''$ 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 attribue à l'action des marées, le viscosité et le frottement de l'Océan agissant sur le noyau solide et comme d'un frein. On se rappelle les discussions d'un haut intérêt que fit naître l'exposé de cette opinion à l'Académie des Sciences de Paris et à la Société royale Astronomique de Londres. S'il y eût eu retour -

-d'attraction de la lune sur la terre par l'intermédiaire des mers, une réaction doit s'ensuivre, comme le faisaient remarquer Bertrand et 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 depuis Delaunay, dont Airy soutenait l'opinion, le coefficient du retard imprimé à la lune est moindre que celui du retard de la rotation de la terre.

La question ainsi posée n'a pas encore aujourd'hui reçu de solution définitive. Mais elle a été l'origine d'importants travaux de G. H. Darwin sur le thème général des marées. L'ensemble de ses recherches forme six Mémoires présentés à la Société royale de Londres de 1879 à 1882.

1°) On the bodily tides of viscous and semi-elastic spheroids....

(Phil. Transactions, 1879, part I).

2°) On the precession of a viscous spheroid and on the remote history of the Earth. (1879, part II).

3°) Problems connected with the tides of a viscous spheroid (1879, part II).

4°) On secular changes in the elements of the orbit of a satellite revolving about a tidally distorted Planet (1880, part II).

5°) On the tidal friction of a Planet attended by several satellites and on the evolution of the solar system (1881, part II).

6°) On the stresses caused in the interior of the Earth by the weights of continents and mountains (1882, part I).

G. H. Darwin joint à chacun de ses Mémoires un résumé en langage ordinaire des résultats auxquels l'ont conduit ses deductions mathématiques - l'impression

l'exposé de sa théorie des résonances, et particulièrement à ceux des Mémoires
initiaux: Changements séculaires des éléments de l'orbite d'un satellite tour-
nant autour d'une planète déformée par les marées, et Du frottement de
la mer 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, d'une part, qu'il est détruit par le frotte-
ment des marées, en quantité de mouvement orbital du corps qui produit
la marée.

La mer que considère M. Darwin n'est pas seulement celle que soulève l'ex-
trémité d'un corps extérieurement dans la couche de liquide dont est revêtue la planète,
mais celle qui affecte la mer 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 mer
liquide de l'Océan sur la croûte solide du globe. [Bien que M. Darwin ait basé ses
recherches sur le frottement dû à cette mer corporelle, il fait néanmoins remarquer que
l'on arriverait aux mêmes résultats par la considération de la seule marée super-
ficielle ou d'une combinaison de celle-ci avec la mer interne.] — Examinons l'ex-
tension de ce frottement de la mer sur la planète, et la réaction qui en résulte sur la

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 le période de révolution de la lune, l'effet de la mer 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 soulève et entraîne par le mouvement trop rapide de rotation de la terre tend à ramener celle-ci en arrière. Si, 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 le résultat 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, ce 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 l'un des deux mouvements de la Lune et de la Terre, 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 venues à tourner tous 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 la course 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 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 de là le plus naturel 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. Le 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 la durée actuelle. La rapidité de la rotation devait être

moins 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. Le forme primitive du satellite a-t-elle été un amas de matières, ou un essaim de météorites, ou bien l'ellipsoïde primitif a-t-il donné immédiatement naissance à deux globes? Est une question que l'état de nos connaissances sur les conditions de stabilité et de rupture d'un mass 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 voit 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 mise sur son orbite plus vite que la terre ne tourne, elle serait retombée sur la terre. Ainsi l'existence de la lune nous fait

IRIS - ELLIAD - Université Lille 1

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 mers, le 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 mers 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, le pôle 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 le marée détermine 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 sur son axe. Ensuite l'excentricité se diminue. Plus tard encore,

lorsque la terre est devenue plus rapide, et que les océans se sont formés, le frottement de la mer et océanique commence à jouer un rôle plus important que celui de la mer et 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 devons plus tard la cause probable de cette obliquité; l'orbite lunaire était dans le plan de l'écliptique. M. Darwin introduit ici la considération de deux plans fictifs qu'il appelle les plans propres de la terre et de la lune. Le plan propre de la lune n'est autre que le plan introduit par Laplace au liv. VII de la Mécanique céleste, chap. II, § 20, pour l'étude des inégalités lunaires dues à la non-sphéricité de la terre et de la lune; ce plan passe constamment par la ligne des équinoxes, le plan de l'orbite de la lune est incliné sur lui d'un angle constant, et la ligne des nœuds de l'orbite avec ce plan rétrograde sur lui d'un mouvement uniforme. Le plan propre de la terre joue le même rôle par rapport à l'équateur. Dans l'état actuel des choses, les deux plans sont inclinés d'un angle constant l'un sur l'autre et sur l'écliptique, ils se coupent dans ce dernier plan, sur lequel leur nœud commun rétrograde d'un lent mouvement précessionnel. L'action solaire a fait varier lentement depuis l'origine la position de ces plans propres et celles de l'équateur et de l'orbite lunaire par rapport à eux.

Les deux plans propres devaient primitivement à très-peu près l'un avec

l'autre et avec l'équateur terrestre, donc aussi avec l'orbite lunaire. Peu à peu, ils se sont écartés l'un de l'autre, l'inclinaison du plan propre de la lune sur l'écliptique a continuellement diminué, tandis que celle du plan propre de la terre a augmenté continuellement. En même temps, les plans de l'équateur terrestre et de l'orbite lunaire oscillaient par rapport à leurs plans propres respectifs. L'inclinaison de l'orbite lunaire sur son plan propre augmenta d'abord, jusqu'à un maximum de 6° et 7° , qui a été atteint à l'époque où le jour avait une durée d'un peu moins de 5 de nos jours. Cette inclinaison a été ensuite constamment en diminuant. L'équateur s'est également incliné de plus en plus sur son plan propre jusqu'à un maximum de $2^{\circ} 45'$, après quoi il s'en est constamment rapproché. L'inclinaison maximum de l'équateur a précédé l'inclinaison maximum de l'orbite lunaire.

Une fois passés les époques de ces maxima, nous avons un système dans lequel aucune nouvelle phase ne survient: le jour et le mois vont en croissant, mais le mois beaucoup plus vite que le jour; l'inclinaison du plan propre de la lune sur l'écliptique et de l'orbite sur son plan propre vont en diminuant, le plan propre de la terre s'écarte de l'écliptique, l'équateur se rapproche de son plan propre; en même temps, l'excentricité de l'orbite lunaire va croissant. Nous arrivons ainsi, au bout d'un temps suffisamment long, à l'état actuel du système de la terre et de la lune.

L'action des mers sur la matière plus ou moins visqueuse du globe terrestre a dû produire, en outre, des effets collatéraux. Le couple de frottement de la mer, d'où résulte le ralentissement du mouvement de rotation,

n'a pas la même valeur aux diverses latitudes, la protubérance de la lune est surtout équatoriale, et, par suite, l'attraction tend à retarder la rotation des régions équatoriales du globe plus que celle des régions polaires. De là dans la masse totale un mouvement de torsion, d'où résulte un mouvement lent de l'ouest vers l'est des régions polaires par rapport à l'équateur. L'attraction est aujourd'hui excessivement faible et n'a certainement laissé aucune trace sensible de son effet dans les dernières périodes géologiques. Mais il se peut qu'elle eût eu une certaine importance à l'époque où la terre était encore presque fluide, et où la lune était beaucoup plus voisine de la terre; et M. Darwin n'est pas éloigné de lui attribuer la forme de nos grands continents. Il eût aussi trouvé l'indice d'un semblable action dans la configuration des îles et des amaux de Mers, tels que les a dessinés M. Schimperelli. Mais il ne faut pas donner à ces remarques plus de valeur que ne leur en attribue l'auteur leur même.

Une deuxième conséquence du frottement des mers est que l'énergie du système va en diminuant; mais le principe de la conservation de l'énergie oblige à admettre que la portion perdue reparait sous forme de chaleur. M. Darwin a consacré un chapitre important de ses recherches à la détermination de la chaleur engendrée dans les régions centrales. Si la terre et la lune ont passé par les périodes successives que suppose M. Darwin, la chaleur ainsi produite suffirait à porter le mass entier de la terre à 3000° Fahrenheit, en lui supprimant la chaleur spécifique du fer, et cette chaleur suffirait à un refroidissement se faisant suivant la loi actuelle pendant 3600 millions d'années. Il semble donc au premier abord que cette prodigieuse quantité de chaleur pourrait être regardée comme l'origine de la chaleur centrale; mais, en réalité, elle ne saurait produire un accident de température du sol supérieur à 1° Fahrenheit pour

chaque 2500 pieds, par conséquent $\frac{1}{50}$ à peine de l'accroissement réel qui estole
la même quantité pour 50 pieds.

L'histoire complète du système de la terre et de la lune est ainsi rattachée par
M. Darwin à une cause mécanique véritable; et il est bien certain que l'exactitude
de ses deductions mathématiques étant admise, on arrive, par l'intervention de
cette seule cause, à produire un système qui a le plus grande ressemblance avec
le nôtre. Mais combien a-t-il fallu de temps pour que l'action réciproque des
marées amenât la lune, du contact de la terre où elle est née, à sa distance actuelle?

G. Darwin a calculé que la durée minimale de cette histoire de la lune est de 54 mil-
lions d'années. Or, nous savons que depuis l'origine de la condensation de la nébu-
leuse solaire, c'est-à-dire depuis une époque bien antérieure à ce que M. Darwin
considère comme l'état primitif de la terre et de la lune, il n'a pu s'écouler jus-
qu'à présent que 20 à 30 millions d'années au maximum. Nous nous re-
trouvons ici en présence de la même difficulté qui s'est toujours dressée devant
l'hypothèse nébulaire, sous quelque forme que celle-ci ait été considérée.

D'autre part, si l'évolution du système lunaire s'est faite sous l'action du
frottement des marées, il faut que des heux au moins d'une semblable ac-
tion se retrouvent dans les autres systèmes de satellites, et peut-être aussi
dans le système des planètes qui sont des satellites du soleil. G. Darwin a
étudié dans ses derniers Mémoires ce nouvel aspect de la question.

Une planète, considérée comme satellite du soleil, tend à produire sur et entre une marée
dont le frottement ralentit la rotation du soleil, et augmente par réaction la vitesse de la pla-
nète sur l'orbite, par conséquent tend à accroître le rayon de l'orbite. En même temps, le soleil

produit sur la planète une marée, dont l'effet est facile à analyser comme nous l'avons fait plus haut. Il en résulte d'une part un ralentissement de la rotation de la planète, et d'autre part un accroissement de la vitesse sur l'orbite, ou un accroissement de la distance au Soleil. Quelle peut être la grandeur de l'un et l'autre de ces deux effets? Si l'on tient compte de l'énorme différence des rayons du Soleil et de la planète et de la gravité à leur surface, ainsi que de la lenteur relative de la rotation du Soleil, on voit d'abord que l'effet de la marée solaire sur la terre est environ 11300 fois plus grand que celui de la marée produite par la terre sur le Soleil; ce dernier est donc tout à fait insignifiant par rapport au premier, ce qui permet de considérer l'effet produit par un soleil rigide sur une planète qu'il déforme incessamment.

Nous avons déjà fait remarquer que le point fondamental de la théorie est la transformation de la quantité de mouvement de rotation d'une planète en quantité de mouvement sur l'orbite. Il suffit donc de calculer, au moins approximativement, les valeurs de ces deux quantités de mouvement pour voir quel accroissement de la vitesse sur l'orbite a pu engendrer le ralentissement de la rotation. Or, ce calcul a montré à M. Le Verrier que la quantité de mouvement d'une planète quelconque, en y comprenant le mouvement orbital de ses satellites qui en dérivent, est toujours très petit par rapport à la quantité de mouvement de la planète sur l'orbite. La plus grande valeur de ce rapport appartient à Jupiter où la quantité de mouvement interne est 0,00026, tandis que la quantité de mouvement orbital est 13 ou 15000 fois la première. D'où il suivrait que si le mouvement de rotation de Jupiter avec ses satellites venait à être détruit par le frottement de la marée solaire, la moyenne distance de Jupiter au Soleil ne serait accrue que de $\frac{1}{2500}$ de sa valeur. Il faudrait donc que,

la rotation des planètes eût été jadis des milliers de fois plus rapide qu'aujourd'hui, pour que l'effet des marées ait pu accroître notablement les rayons de leurs orbites. Il est vrai que, les planètes étant alors beaucoup plus voisines du Soleil, les marées soulevées par elles sur cet astre auraient ajouté un effet sensible à celui des marées produites par le Soleil sur les planètes. Mais il est peu probable que les masses planétaires aient jamais eu des vitesses de rotation aussi énormes que le voudrait cette hypothèse; et M. Darwin est conduit à admettre que les planètes, formées de portions détachées d'une nébuleuse en voie de contraction, sont nées très probablement aux distances mêmes, ou à peu près, où elles se trouvent aujourd'hui. Il faut d'ailleurs remarquer qu'il serait difficile de concilier un élargissement progressif du système planétaire avec l'existence de la loi à laquelle semblent soumettre les distances actuelles des planètes au Soleil. La loi de Bode, quelque valeur qu'on veuille lui attribuer, apparaît comme le vestige, un peu déformé sans doute, de l'influence des lois qui ont déterminé les époques successives d'instabilité de la nébuleuse en mouvement de rotation et de contraction. Elle aurait complètement disparu, si une cause quelconque avait notablement changé les distances planétaires.

Mais si l'action des marées solaires n'a pu altérer la moyenne distance des planètes, il ne semble pas impossible de lui attribuer une part d'influence dans l'excentricité des orbites, et aussi l'inclinaison des axes de rotation sur le plan de ces orbites.

C'est surtout dans la formation des systèmes secondaires, beaucoup plus resserrés que le système des planètes, que l'on doit espérer retrouver des traces de l'action du frottement des marées. D'après l'hypothèse nébuleuse, une nébuleuse planétaire se contractant

et tourne plus vite à mesure qu'elle se contracte. La rapidité de la rotation rend bientôt sa forme instable; une portion de matière s'en détache, soit sous forme d'anneau, soit autrement; et comme cette portion détachée était celle qui possédait la plus grande quantité de mouvement angulaire, le reste peut reprendre une forme d'équilibre. Il se reproduit ainsi à intervalles une série d'époques d'instabilité et de production de satellites.

Mais le frottement de la marée solaire agit en sens contraire de la contraction et tend à diminuer la vitesse de rotation. Par suite donc de la simultanéité des deux actions, les époques d'instabilité reviennent à de plus longs intervalles que si la contraction agissait seule. Si même l'action retardatrice de la marée est suffisante, cette instabilité ne se produira jamais, et par conséquent, les planètes les plus voisines du Soleil, Mercure et Vénus, ne se sont pas trouvées dans les conditions favorables à la production d'un satellite. Les grandes planètes plus éloignées du Soleil ont dû, au contraire, voir les périodes d'instabilité se renouveler fréquemment, en raison de la faiblesse des marées solaires; elles doivent donc posséder un plus grand nombre de satellites. Pendant la contraction de la masse terrestre, l'équilibre a pu exister longtemps entre l'attraction due à la contraction et le ralentissement produit par la marée. Le jour a donc dû être à une époque déjà avancée de l'histoire de la Terre et lorsque celle-ci s'était contractée presque à ses dimensions actuelles. - Il n'est donc pas étonnant que la Terre possède relativement à la Terre une masse plus considérable que celle des autres satellites en regard de leurs planètes, si ceux-ci se sont formés dans des conditions différentes. De même aussi la genèse d'un gros satellite, auprès d'une planète déjà avancée en âge, a produit des marées considérables dans le système, et l'on doit s'attendre à voir l'action de ces marées

prédominer dans les phases successives qui ont amené le système à son état actuel.

L'action de la marée solaire sur Mars est à fort peu près la même que sur la terre. La masse de cette planète est fort petite. On doit donc supposer que Mars est entré à une période très avancée de son histoire, et c'est ce que confirme l'existence de ses singuliers satellites, Phobos en particulier. Ce corps s'est formé comme la lune au contact de Mars; mais la petitesse du satellite n'a donné à l'action des marées qu'une influence extrêmement faible sur l'état du système: le satellite s'est éloigné, mais à une très petite distance, en même temps que sa période de révolution augmentait, et que la vitesse de rotation de la planète diminuait d'une quantité presque infinitésimale. Il est donc venu bientôt perdre un temps, qui eût été plus tard pour la lune, où les deux vitesses sont devenues angulairement égales; et à partir de ce moment, le frottement de la marée solaire a continué à diminuer la vitesse angulaire de Mars, la réaction de la marée sur le satellite a changé de sens, la vitesse de celui-ci sur son orbite s'est accrue et en même temps il s'est rapproché de sa planète, mais très lentement. C'est ce que les âges futurs verront se passer dans le système de la terre et de la lune; mais tandis que celle-ci, en raison de sa grande masse, devra s'éloigner beaucoup de la terre avant que la réaction des actions ait lieu, le petit satellite de Mars n'a eu besoin d'aller qu'à une faible distance de sa planète avant de revenir vers elle. Le second satellite, Deimos, fait encore sa révolution en $30^h 18^m$, tandis que Mars tourne sur lui-même en $24^h 37^m$; Deimos doit donc encore aujourd'hui s'éloigner de la planète, mais très lentement. Les plans des orbites doivent se trouver à fort peu près en coïncidence avec l'équateur de la planète. Celui-ci est assez fortement incliné, 27° , sur le plan de l'orbite; cette inclination son serait due entièrement aux marées solaires, et sa persistance indique aussi une

évolution déjà très avancée de Mars, si primitivement son axe a été presque exactement perpendiculaire à l'écliptique.

L'énorme planète Jupiter tourne sur elle-même en dix heures environ; son axe est presque perpendiculaire au plan de l'orbite; trois de ~~ses~~ satellites font leur révolution en sept jours au plus, le quatrième n'a encore qu'une période de 16^d 16^h. Tous ces satellites sont ceux d'une planète beaucoup moins avancée en âge que la nôtre. Cette lenteur de l'évolution tient d'une part à la grandeur de la masse de Jupiter et à la petitesse relative des satellites, qui n'ont soulevé sur la planète que des mers insignifiantes, incapables de modifier rapidement leurs orbites; et d'autre part à l'éloignement du Soleil, qui n'a pu aussi retarder que très lentement la rotation de la planète. Cette diminution de l'action retardatrice du Soleil est l'explication de la vitesse de rotation dont sont doués les gros satellites, tandis que les plus voisins du Soleil tournent plus lentement sur elle-même.

Saturne est dans le même cas que Jupiter, mais il présente certaines particularités difficiles à expliquer. Sa rotation rapide, l'existence de l'anneau, la brièveté de la durée de révolution des satellites intérieurs, tout cela indique une période d'évolution encore peu avancée; tandis que la grande durée de révolution des satellites extérieurs et la forte inclinaison de l'équateur sont des indices d'un âge plus avancé. Il semble difficile d'admettre, puisque les plans de l'anneau et des orbites des satellites sont en général voisins de l'équateur de la planète, que l'inclinaison de ce dernier plan puisse résulter uniquement de l'action des mers; c'est une remarque que j'ai déjà faite plus haut. Aussi M. Serway est-il parti à croire à l'existence d'une obliquité primitive, produite à la naissance même de la planète par des causes différentes de celles qu'il invoque pour expliquer l'obliquité des équateurs des corps voisins du Soleil. À plus forte raison, faut-il renoncer à

trouver dans l'action des marées le cause de la position singulière des axes de rotation d'Uranus et de Neptune, qui reste jusqu'à présent complètement inexpliquée.

L'introduction de l'action des marées dans l'évolution du système planétaire n'aurait été un fait d'une notable importance, et j'espère que l'analyse très incomplète que je viens de faire des travaux de M. Darwin, en essayant de traduire en langage ordinaire les résultats de recherches mathématiques fort complexes et très ardues, donnera à nos jeunes Géomètres le désir de connaître et d'apprécier à sa juste valeur une cause de perturbation des mouvements des astres dont le Mécanisme céleste de Laplace n'a tenu aucun compte. Sans doute les théories de M. Darwin laissent intacts les points fondamentaux de l'hypothèse nébulaire; elles ne touchent ni à la genèse des planètes, ni même à celle des satellites des planètes extérieures. Mais elles nous indiquent l'existence d'un cause qui a pu et qui a dû modifier considérablement l'état primitif très simple du système et y introduire ces excentricités et ces inclinaisons qui en altèrent aujourd'hui la simplicité et la régularité originelles. Dans le cas particulier de la Terre et de la Lune, qui a toujours embarrassé les auteurs des hypothèses cosmogoniques et les a forcés à introduire des suppositions spéciales, M. G. Darwin montre que l'action des marées a dû jouer un rôle très important et sans doute le plus important, si bien que la considération de cette seule action a pu le conduire à rendre compte de l'état actuel du système terrestre, et à établir des relations nécessaires de grandeur entre les données actuelles du jour et du mois, l'obliquité de l'écliptique et l'inclinaison et l'excentricité de l'orbite lunaire. Il faut remarquer que, si ce résultat a été obtenu en supposant la Terre à l'état visqueux et subissant par l'action des marées des déformations de toute sa masse, les mêmes effets

se produiraient à fort peu près, quelle que soit la nature de la marée qui engendrerait les frottements.

Mais la théorie de l'évolution du système terrestre, telle que l'expose M. Darwin, le conduit à un énoncé qui suffirait à rendre impossible la conciliation de cette histoire particulière avec l'hypothèse nébulaire. Il faut au minimum 54 millions d'années à l'action des marées pour amener la lune de sa position primitive où elle s'est détachée de la terre, déjà fort avancée en âge, à la distance où elle se trouve aujourd'hui. L'estimation de la chaleur engendrée par la condensation totale de la nébuleuse solaire montre que la durée du système complet ne peut dépasser 30 millions d'années. Il y a donc incompatibilité entre l'hypothèse nébulaire et la théorie de M. Darwin, si l'on veut suivre celle-ci jusque dans ses dernières conséquences, et supposer avec cet auteur que la lune s'est détachée de la terre, à une époque où celle-ci était un globe de 8000 milles de diamètre.

Pourrait-on concilier les deux hypothèses, en faisant remonter la naissance de la lune à une époque antérieure? M. Darwin a poussé l'interprétation en arrière, jusqu'au moment où l'équateur de la terre était incliné de 11° seulement sur l'écliptique et où la période de sa rotation était de $2^{\text{h}} 4^{\text{h}}$ seulement. Il faudrait attribuer cette interprétation à une époque moins reculée de l'histoire de la terre; la durée de rotation serait plus considérable, la contraction était beaucoup moindre; mais il faudrait aussi que l'obliquité de l'équateur sur l'écliptique fût déjà à ce moment assez considérable, puisque l'action des marées lunaires, par laquelle M. Darwin l'explique en majeure partie, n'aurait qu'une durée beaucoup moindre. Quelle serait donc l'origine de cette obliquité primitive? Il faudrait la trouver dans l'action du Soleil sur la marée qu'il soulève sur la terre, et à laquelle M. Darwin semble attribuer, en moins en partie, celle

de 11° qu'il suppose exister lors de la naissance de la lune. D'autre part, le rapidité de rotation de la terre, et tout beaucoup moindre, la figure de l'ellipsoïde nébuleux terrestre ne serait plus un forme instable, et la lune ne se détacherait plus de la terre de la façon que suppose notre auteur. Il faudrait le faire naître comme l'a admis M. Roche par exemple; et dès lors le rôle des marées, mis en lumière d'une manière si saisissante par M. Darwin, se réduirait à une action bien moindre, éloignement progressif de la lune, augmentation de la durée du mois et du jour, accroissement de l'obliquité de l'écliptique, jusqu'à l'état actuel du système.

Mais je ne dois pas oublier de faire remarquer que cette objection tirée de la durée de l'évolution, se dressent contre toutes les hypothèses. Elle doit donc être considérée comme s'attaquant bien plutôt à l'absence de l'hypothèse nébulaire elle-même qu'à ses divers manières dont cette hypothèse a pu être traitée. Elle est née de la conception même que nous nous sommes faite de l'état de la nébuleuse primitive, dans laquelle nous avons voulu voir la matière à l'état le plus simple, en déséquilibre complet et au zéro absolu de température. Dès lors, la chaleur engendrée par la condensation de cette nébuleuse est nécessairement limitée; et il se trouve que l'espace de temps dans lequel cette énergie calorifique peut être dissipée n'est plus suffisant à la durée de l'évolution géologique de la terre. M. Joly a cherché à allonger autant que possible cette durée limitée; j'i me vois pas qu'il ait pu parvenir à satisfaire les géologues. M. Darwin, de son côté, prend la terre à une époque où elle était déjà fortement condensée et presque arrivée au commencement des périodes géologiques, et il vient se buter à la même difficulté. Si les exigences des géologues sont justifiées, si le frottement des marées, tel que l'introduit M. Darwin, est la cause réelle de l'état actuel du système terrestre,

c'est la base même de l'hypothèse nébulaire qu'il faut modifier; ou plutôt, il faut attendre du temps et des investigations futures la réconciliation des théories en apparence aujourd'hui contradictoires.

Celle-ci paraît être la pensée de l'éminent analyste anglais: « Mes recherches, dit-il, n'apportent aucune raison de rejeter l'hypothèse nébulaire; mais tout en conservant les traits principaux de cette théorie, elles y introduisent des modifications d'une importance considérable. Le froissement des marées est un cause de changement dont la théorie de Laplace n'a point tenu compte, et bien que l'activité de cette cause doive être regardée comme appartenant plus spécialement à une époque ultérieure aux événements décrits dans l'hypothèse nébulaire, cependant son influence a été de grande importance, et même dans le cas de la lune d'une importance prépondérante, dans ^{le développement de} l'état présent des planètes et de leurs satellites (On the tidal friction of a planet attended by several satellites, etc., p. 535).

~~~~~

