

ficatifs 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 coïncidaient 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 augmente d'abord, jusqu'à un maximum de 6° à 7° , qui a été atteint à l'époque où le jour avait une durée d'un peu moins de 9 de nos heures actuelles, et où le mois durait un peu moins de 6 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 passées 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 crois-

sant. 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 marées sur la matière plus ou moins visqueuse du globe terrestre a dû produire, en outre, des effets collatéraux. Le couple de frottement de la marée, d'où résulte le ralentissement du mouvement de rotation, n'a pas la même valeur aux diverses latitudes; la protubérance de la marée est surtout équatoriale, et, par suite, la Lune 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. Cette action 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 ait 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 croit aussi trouver l'indice d'une semblable action dans la configuration des îles et des canaux de Mars, tels que les a dessinés M. Schiaparelli. Mais il ne faut pas donner à ces remarques plus de valeur que ne leur en attribue l'Auteur lui-même.

Une deuxième conséquence du frottement des marées 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 reparaît sous forme de chaleur. M. Darwin a consacré un chapitre important de ses recherches à la détermination de la chaleur engendrée par le frottement dans l'intérieur d'un sphéroïde visqueux tordu par l'action des marées. Il en résulte que la portion de beaucoup la plus grande de cette chaleur est 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 la masse entière de la Terre à 3000° Fahrenheit, en lui supposant 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 accroissement actuel de la température du sous-sol supérieur à

1° Fahrenheit pour chaque 2600 pieds, par conséquent $\frac{1}{50}$ à peine de l'accroissement réel qui est de 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 déductions mathématiques étant admise, on arrive, par l'intervention de cette seule cause, à produire un système qui a la 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? M. G. Darwin a calculé que la durée minima de cette histoire de la Lune est de 54 millions d'années. Or, nous savons que depuis l'origine de la condensation de la nébuleuse 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 jusqu'à présent que 20 à 30 millions d'années au maximum. Nous nous retrouvons 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 traces au moins d'une semblable action se retrouvent dans les autres systèmes de satellites, et peut-être aussi dans le système des planètes qui sont les satellites du Soleil. M. 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 cet astre une marée dont le frottement ralentit la rotation du Soleil, et augmente par réaction la vitesse de la planète 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 113000 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. G. Darwin que la quantité de mouvement de rotation d'une planète quelconque, en y comprenant le mouvement orbital de ses satellites qui en dérive, 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 du mouvement orbital est 13 ou 5000 fois le premier. 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 masse nébulaire en voie de contraction, sont nées très probablement aux distances mêmes, ou à peu près, où elles se trouvent aujourd'hui. Il fait remarquer d'ailleurs qu'il serait difficile de concilier un élargissement progressif du système planétaire avec l'existence de la loi à laquelle semblent soumises 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 con-

traction. Elle aurait complètement disparu, si une cause quelconque avait notablement changé les distances planétaires; c'est une remarque que nous avons déjà faite en discutant la nouvelle conception cosmogonique de M. Faye.

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 nébulaire, une nébuleuse planétaire va 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'accélération due à la contraction et le ralentissement produit par la marée. La Lune a donc dû naître à une époque déjà avancée de l'histoire de la Terre et lorsque celle-ci s'était déjà contractée presque à ses dimensions actuelles. Nous avons vu que M. Roche est arrivé aussi de son côté à des conclusions semblables. Il n'est donc pas étonnant que la Lune possède relativement à la Terre une masse plus consi-

dérable 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 déjà arrivé 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 pour lui un temps, qui arrivera 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 réversion 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, Déimos, fait encore sa révolution en $30^h 18^m$, tandis que Mars tourne sur lui-même en $24^h 37^m$; Déimos 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 inclinaison serait due entièrement aux marées solaires, et sa grandeur 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^j 16^h. Tous ces caractères 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 marées 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 douées les grandes planètes, tandis que les plus voisines du Soleil tournent plus lentement sur elles-mêmes.

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 marées; c'est une remarque que j'ai déjà faite plus haut. Aussi M. Darwin est-il porté 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. A plus forte raison, faut-il renoncer à trouver dans l'action des marées la 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 me paraît être 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'appré-

cier à sa juste valeur une cause de perturbation des mouvements des astres dont la *Mécanique 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'une 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 durées 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 a fallu 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 poursuivi l'intégration 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^h à 4^h seulement. Il faudrait arrêter cette intégration à une époque moins reculée de l'histoire de la Terre; la durée de rotation serait plus considérable, la contraction étant 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 alors 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, au moins en partie, celle de 11° qu'il suppose exister lors de la naissance de la Lune. D'autre part, la rapidité de rotation de la Terre étant beaucoup moindre, la figure de l'ellipsoïde nébuleux terrestre ne serait plus une forme instable, et la Lune ne se détacherait plus de la Terre de la façon que suppose notre auteur. Il faudrait la faire naître comme l'a admis M. Roche par exemple; et dès lors le rôle des marées, mis en lumière d'une façon 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 d'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, nous l'avons rencontrée se dressant contre toutes les hypothèses, aussi bien contre celles de Laplace et de M. Faye que contre l'hypothèse plus restreinte de M. G. Darwin. Elle doit donc être considérée comme s'attaquant bien plutôt à la base de l'hypothèse nébulaire elle-même qu'aux diverses manières dont cette hypothèse a pu être traitée. Elle est née de la conception 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 désagrégation complète 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. Faye a cherché à allonger autant que possible cette durée

limite; je ne crois pas qu'il soit parvenu 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 de théories en apparence aujourd'hui contradictoires.

Telle me 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 frottement des marées est une 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 la détermination de l'état présent des planètes et de leurs satellites (*On the tidal friction of a planet attended by several satellites, etc.*, p. 535) ».

Cette action des marées, assez puissante pour faire naître de nouveaux astres à l'époque de fluidité des planètes, persiste encore aujourd'hui au moins sur la partie encore liquide de ces corps, et, quoique bien affaiblie, doit modifier lentement l'état du système tout entier. Il nous reste à examiner, dans un dernier Chapitre, à la lumière de ces données nouvelles, ce qu'il adviendra, dans la suite des temps, de notre système planétaire.