

Zeitschrift: Bulletin de la Société des Sciences Naturelles de Neuchâtel
Herausgeber: Société des Sciences Naturelles de Neuchâtel
Band: 7 (1864-1867)

Artikel: Sur les causes cosmiques des changements de climat
Autor: Hirsch
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-88033>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 05.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

APPENDICES.

SUR LES

CAUSES COSMIQUES

DES CHANGEMENTS DE CLIMAT.

PAR M. LE D^r Ad. HIRSCH.

I.

L'ancienne extension considérable des glaciers, démontrée par les phénomènes erratiques pour une assez grande partie des régions tempérées, demande, pour être expliquée, sinon un abaissement notable de la température moyenne, au moins un autre caractère de climat. Elle indique surtout une distribution de la température suivant les saisons extrêmes assez différente de celle qui existe aujourd'hui dans les mêmes régions. On sait que la géologie, en étudiant les créations des différentes époques ensevelies dans les couches superposées du sol, est arrivée à reconnaître que les conditions climatiques de grandes régions de notre planète ont subi des changements notables. Dernièrement encore, M. Heer de Zurich, en examinant de près les plantes qui ont formé la forêt fossile d'Atanakerdluk, arrive au résultat que la partie septentrionale du Groënland avait autrefois une température beaucoup plus élevée qu'à présent ; car il évalue la température moyen-

ne à laquelle la flore de cette forêt pouvait vivre, au moins à $+ 9^{\circ}, 5$, tandis que la température actuelle de ce pays est de $- 6^{\circ}, 3$; ce qui donnerait un abaissement de 16° environ. — Si les paléontologues sont rarement obligés de supposer des changements de climat aussi énormes, on sait néanmoins, d'après le témoignage des flores et des faunes miocènes, que toute l'Europe, l'Islande et le Spitzberg compris, a dû jouir autrefois d'un climat plus méridional que le climat actuel.

Il est naturel que de pareils faits aient vivement frappé l'imagination des géologues et que ceux-ci, ne pouvant expliquer ces changements de climat par les lois qui règlent actuellement la distribution de la température à la surface du globe, aient eu recours à des causes cosmiques. Ils se sont adressés aux astronomes pour qu'ils leur indiquent des modifications dans les conditions de notre planète qui puissent rendre compte d'un abaissement ou d'une élévation considérable de la température de toute la terre ou du moins de grandes parties de sa surface.

Dans la période dramatique de la géologie, où l'on rêvait partout et toujours de grandes catastrophes subites pour expliquer, soit la retraite ou le retour des différentes mers qui ont déposé les roches neptuniennes, soit le soulèvement et les déchirures des montagnes, on s'imaginait aussi que de pareilles révolutions devaient transformer brusquement le climat d'une région: de polaire le rendre tempéré ou tropical, et vice versa.

La même comète qui, par son choc terrible contre notre planète, avait dû changer l'assiette des mers, avait en même temps, en déplaçant l'axe du globe terrestre, modifié complètement les climats de ses différentes régions.

Mais l'astronomie a refusé d'admettre de pareilles catastrophes, en insistant sur les conditions de stabilité de notre système solaire, et en montrant pour ce cas spécial que la masse infime d'une comète ne pourrait jamais produire de si énormes effets. Ensuite d'autres considérations purement géologiques ont remplacé tous ces bouleversements et toutes ces révolutions terribles par les effets lents et normaux des forces ordinaires de la nature, qui, en s'accumulant dans des

périodes d'une durée immense, peuvent parfaitement rendre compte des plus grands changements que l'on constate sur la terre.

Dès le moment qu'on ne demandait plus à l'astronomie que de rechercher s'il n'y a pas dans la constitution de l'univers quelques éléments qui, par une variation régulière, lente et séculaire, puissent modifier soit la somme totale de la chaleur du globe, soit sa distribution générale dans les différentes régions et saisons, la question perdait son caractère fantastique et purement hypothétique; alors les grands maîtres de notre science s'en sont occupés sérieusement.

Le résultat de ces recherches n'a pas été en général complètement satisfaisant. On a bien pu indiquer quelques variations séculaires qui, dans des époques très-longues et très-éloignées ont pu modifier sensiblement la température du globe; mais la science se trouve jusqu'à-présent incapable d'expliquer par ces causes seules des changements énormes semblables à celui que M. Heer a signalé pour le Groënland.

En me proposant de résumer ce que la mécanique céleste peut nous enseigner sous ce rapport, je laisserai de côté, pour le moment, et l'influence, aujourd'hui presque insensible, de la chaleur propre de la terre, et celle de la température de l'espace interplanétaire. Ces deux éléments ne peuvent changer que la température du globe tout entier, tandis qu'un grand nombre des phénomènes géologiques qu'il s'agit d'expliquer n'embrassent qu'une partie de la surface de la terre à la même époque. Du reste, la chaleur propre du globe a pu, en diminuant, produire seulement un refroidissement général de la surface et non pas une alternance de climats, comme celle que nous remarquons dans les phénomènes glaciaires qui, pour nos régions, supposent une alternance de périodes froides et de périodes tempérées.

Je laisserai de côté également la question de la plus ou moins grande quantité de chaleur que le soleil a pu émettre dans le courant des siècles par suite de changements qui seraient survenus dans la photosphère du corps central; nous ne possédons encore sur cette question aucune donnée certaine.

II

En admettant l'équilibre général établi entre la température de l'espace, la chaleur propre du globe et la quantité de chaleur qu'il reçoit du soleil; en regardant ensuite la température terrestre et sa répartition dans les différentes régions et dans les différentes saisons, comme une fonction de l'action solaire, on reconnaît que cette action ne peut être modifiée que par deux causes : ou bien par un changement dans la distance de la terre au soleil, ou par l'inclinaison différente sous laquelle telle partie du globe reçoit les rayons solaires.

Il est connu qu'une des lois fondamentales de la mécanique céleste établit pour notre système planétaire l'invariabilité des grands axes des orbites, ce qui revient à dire que la distance moyenne des planètes au soleil reste la même.

Il est connu également que l'axe de la terre reste parallèle à lui-même, abstraction faite des phénomènes de la précession des équinoxes et de la nutation ; le premier, dû à l'action du soleil, fait décrire au pôle équatorial un cercle de $23^{\circ},5$ autour du pôle de l'écliptique dans une période d'environ 26,000 ans ; le second, dû à l'action de la lune, fait décrire à ce même pôle de petites ellipses de $18'',5$ de diamètre dans la période de 19 ans. Mais ces phénomènes n'intéressent point la question qui nous occupe ; car leur effet se réduit à un mouvement des nœuds de l'équateur qui rétrogradent de $50'',2$ par an sur l'écliptique, sans que pour cela l'inclinaison entre les deux plans soit changée. Or, si la hauteur du pôle au-dessus de l'horizon n'est pas changée (changement qui supposerait un déplacement de l'axe dans l'intérieur du globe), ni l'obliquité de l'écliptique modifiée, le climat d'un endroit, en tant qu'il dépend du soleil, ne saurait varier.

Mais si les conditions physiques d'une planète ne sont point influencées par la position des nœuds, il n'en est pas de même pour l'inclinaison de son orbite par rapport à son équateur ; car cet élément influe sur la durée des jours et sur les hauteurs extrêmes auxquelles le soleil peut se lever dans le courant d'une année pour une latitude donnée ; par suite, la

durée des saisons et le caractère de tout le climat en dépend. Si, par exemple, l'écliptique coïncidait avec l'équateur, il est évident que pour toute la terre la durée des jours et des nuits serait la même et que pour chaque endroit le soleil aurait la même hauteur pendant toute l'année; c'est-à-dire, qu'il n'y aurait plus de saisons, et que la température moyenne annuelle serait aussi celle de chaque jour : un printemps perpétuel existerait pour toute la terre. Si au contraire l'écliptique était perpendiculaire à l'équateur et coïncidait avec les méridiens, toutes les régions terrestres verraient successivement le soleil à leur zénith à une certaine saison, et à une autre saison elles ne le verraient pas se lever du tout; le contraste entre l'hiver et l'été deviendrait extrême pour toutes les régions de la terre.

Mais ces cas extrêmes ne sont pas ceux de la nature, et la mécanique céleste a prouvé qu'ils n'ont jamais existé et qu'ils ne peuvent jamais arriver pour la terre. Cependant ils font comprendre qu'une variation, même peu considérable, de l'obliquité de l'écliptique devrait sensiblement modifier les climats. Or, nous savons par l'observation, qu'une telle variation existe, et la théorie nous apprend qu'elle est causée par l'action perturbatrice des autres planètes sur l'orbite terrestre. Non seulement nous pouvons constater par nos moyens perfectionnés, que l'inclinaison de l'écliptique diminue actuellement chaque année de $0'',48$ ou de $48'',368$ par siècle, mais nous trouvons encore que les anciennes mesures de cette obliquité, faites par l'empereur chinois Tschou-Kong, 1,100 ans avant Jésus-Christ, par Pythéas, à Marseille, 350 ans avant J.-C, par les astronomes Arabes au moyen âge et enfin par les astronomes du dernier siècle, s'accordent toutes à montrer une telle diminution de l'inclinaison de l'écliptique.

Cependant cette diminution ne continue pas *ad infinitum*; l'expression analytique qui représente cette variation ne contient pas de termes proportionnels au temps, mais seulement des termes périodiques; par conséquent la diminution de l'obliquité se ralentira, finira par devenir constante et puis recommencera à augmenter. Autrement dit : l'écliptique a un mouvement oscillatoire autour du plan de l'équateur, s'accor-

plissant dans des périodes assez longues et dans des limites assez étroites.

Mais quelles sont ces limites? Cette question a été étudiée par les grands analystes qui se sont occupés de l'ardue problème des variations des éléments planétaires, provenant de leurs perturbations réciproques. Euler a posé les bases sur lesquelles Lagrange, dans ses célèbres mémoires de Berlin, de 1781 et 1782, a érigé la théorie des perturbations, en se fondant sur la petitesse des masses planétaires, ainsi que sur celle des excentricités et des inclinaisons de leurs orbites. Lagrange, par un artifice heureux, et en introduisant des variables, par lesquelles les inclinaisons se trouvent accouplées aux longitudes des nœuds et les excentricités aux longitudes des périhélies, est parvenu à rendre linéaires les équations différentielles qui déterminent les variations séculaires. Les formules de Lagrange ont été étendues et perfectionnées par Laplace, dans le deuxième livre de la *Mécanique céleste*, et puis par Poisson. Enfin M. Le Verrier, dans des mémoires qui ont paru comme additions à la *Connaissance des Temps* de 1843 et 1844, en a développé toutes les applications numériques en utilisant les données les plus précises que nous possédons aujourd'hui sur les masses et les autres éléments planétaires.

D'après Lagrange l'écliptique oscillerait entre les limites de 21° et 28° , et son obliquité aurait plusieurs époques de maxima et de minima, selon les constellations différentes des principales planètes perturbatrices. Laplace a réduit ces limites assez notablement. « Le déplacement de l'écliptique, dit-il dans son *Exposition du système du monde*, en se combinant avec l'action du soleil et de la lune sur la terre, produit dans son obliquité sur l'équateur une variation très-différente de ce qu'elle serait par ce déplacement seul. L'étendue entière de cette variation serait, par ce déplacement, d'environ 12° , et l'action du soleil et de la lune la réduit à peu près à 3° (centésimaux). »

M. Le Verrier, en appliquant les formules de Lagrange à l'ensemble des sept planètes principales, a trouvé des limites supérieures pour les inclinaisons de leurs orbites sur l'éclipti-

que de 1800, qui ne diffèrent pas considérablement des résultats de Lagrange. Pour la terre, il donne comme limite supérieure de cette inclinaison $4^{\circ}52'$.

Si l'on doit admettre avec Biot que la théorie n'a pas encore pu parvenir à déterminer d'une manière définitive les limites entre lesquelles l'obliquité de l'écliptique varie, on peut cependant, d'après la constitution du système planétaire, démontrer que ces limites existent et qu'elles sont très-peu étendues. On peut affirmer surtout que le plan de l'écliptique n'a jamais coïncidé et ne coïncidera jamais avec l'équateur, ni ne s'en éloignera au-delà de $28\frac{1}{2}^{\circ}$.

Si l'on part du résultat de Laplace, la température annuelle de nos régions aurait pu changer, par l'effet de l'obliquité de l'écliptique, d'environ 1° , et la différence entre les saisons extrêmes de 2° à 3° . Suivant les limites de Lagrange, ces chiffres seraient doublés. Pour les régions polaires l'effet est plus considérable encore et peut aller pour la température annuelle jusqu'à 4° . Le froid polaire augmente lentement de siècle en siècle, aussi longtemps que l'obliquité de l'écliptique diminue, c'est-à-dire, d'après Lagrange jusqu'en 6600 de notre ère.

D'après ce dernier géomètre, le minimum absolu de l'obliquité serait arrivé 14400 ans avant notre ère. Il appartient aux géologues de dire, si cette époque peut coïncider avec l'époque glaciaire; car le minimum d'inclinaison est naturellement favorable au développement des glaciers, en diminuant la chaleur estivale et en adoucissant l'hiver, ce qui augmente la quantité de neige.

Nous ajouterons encore que, quand même le résultat de Laplace serait définitif, quelques degrés de plus ou de moins pour la différence des températures extrêmes peuvent avoir déjà un effet sensible sur le développement des glaciers, mais ne suffisent pourtant pas pour expliquer leur extension énorme.

III

Le second élément qui peut avoir de l'influence sur la température, c'est l'excentricité de l'orbite terrestre. Pour ce qui

concerne d'abord la température moyenne, on comprend facilement qu'une planète dont la distance moyenne au soleil est invariable, reçoit de celui-ci une quantité de chaleur qui dépend de la plus ou moins grande excentricité de son orbite.

En effet, cette quantité de chaleur est une fonction de la distance de la planète au soleil et du temps pendant lequel elle conserve cette distance. Si on appelle celle-ci r , dt l'élément du temps et dA l'élément de chaleur reçue pendant le

temps dt , on a $dA = \frac{dt}{r^2}$

D'après la loi des aires, si $d\theta$ représente l'angle décrit par le rayon vecteur r pendant le temps dt , et c une constante,

on a aussi $r^2 d\theta = c dt$, d'où $dt = \frac{r^2 d\theta}{c}$
et $dA = \frac{d\theta}{c}$.

$$\text{Enfin } A = \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{c} = \frac{2\pi}{c}$$

Cette intégrale exprime la quantité totale de chaleur reçue par la planète pendant une révolution. Mais on sait que

$$c = \frac{2\pi ab}{T}$$

(a représente le demi grand axe, b le demi petit axe de l'ellipse décrite et T la durée d'une révolution entière.)

$$\text{Il en résulte } A = \frac{T}{ab} \quad (1)$$

$$\text{ou encore } A = \frac{T}{a^2 \sqrt{1-e^2}} \quad (2)$$

Ces formules expriment la relation qui existe entre la quantité de chaleur reçue et l'excentricité e de l'orbite. Sir John Herschel a développé la relation (1) dans le théorème suivant: « Si l'excentricité de l'orbite varie, la somme totale de chaleur que la terre reçoit du soleil dans le courant d'une année, est inversement proportionnelle au petit axe de son orbite. »

Maintenant l'on sait que l'excentricité de la terre diminue depuis longtemps et va encore en diminuant; il s'ensuit donc que le petit axe augmente et que la somme de chaleur que nous recevons par an va depuis longtemps en diminuant, ce qui serait assez d'accord avec l'opinion des géologues, qui admettent un refroidissement général des climats terrestres.

Cependant, non seulement cet effet ne peut plus aller très-loin, puisque l'orbite de la terre s'approche déjà beaucoup du cercle; mais on peut encore démontrer que cette cause n'a jamais pu être d'une grande importance pour la température moyenne; car il faut une forte diminution de l'excentricité pour produire une augmentation sensible du petit axe, ainsi qu'on peut le voir par le tableau suivant:

<i>Excentricité.</i>	<i>Petit axe.</i>	<i>Chaleur reçue.</i>
0,0	1,000	1,000
0,05	0,999	1,002
0,10	0,995	1,005
0,15	0,989	1,011
0,20	0,980	1,021
0,25	0,968	1,032
0,30	0,954	1,048

On voit ainsi qu'une augmentation de l'excentricité égale à un quart, c'est-à-dire, un changement de la forme circulaire jusqu'à celle de l'orbite de Junon ou de Pallas, n'augmenterait la somme de la chaleur annuelle que de 3 p. cent.

Or, est-ce que l'excentricité de l'orbite terrestre, qui est actuellement 0,01677, a jamais pu atteindre une pareille valeur par suite des perturbations planétaires? Lorsqu'on calcule d'après la formule de Lagrange, — vérifiée par Laplace, — qui donne la limite supérieure que les excentricités planétaires peuvent atteindre par suite des perturbations, on trouve pour celle de la terre 0,07775. Or, à cette valeur extrême correspond le petit axe 0,99695, tandis que la valeur actuelle de l'excentricité donne 0,99985, et que la valeur minima à laquelle elle peut descendre, correspond au petit axe 0,99999. Il s'ensuit que si l'on prend pour unité la quantité de chaleur que notre globe recevrait du soleil, s'il tournait autour de lui dans une orbite parfaitement circulaire, cette quantité serait

1,00001 pour la valeur minima de l'excentricité, 1,00015 dans l'orbite actuelle et 1,003 pour la plus grande excentricité qu'il soit possible d'admettre.

On voit donc que, si l'excentricité allait en décroissant jusqu'à disparaître, la chaleur actuelle du globe en serait diminuée dans une proportion insensible, et qu'en admettant pour l'excentricité dans les temps passés la plus forte valeur possible, la chaleur reçue par la terre ne peut avoir été, pour cette cause, que de 0,003 plus forte qu'actuellement.

Pour exprimer ce résultat en degrés de thermomètre, il faut évaluer l'effet calorifique total du soleil en partant d'une supposition sur la température de l'espace. Si l'on prend pour cette température la valeur de Pouillet, -142° , ou celle de Herschel, -150° , et qu'on évalue la température la plus élevée que l'action du soleil produit sous les tropiques, à $+55^{\circ}$, on peut exprimer l'action totale du soleil par 200° environ. *Donc tout le changement que la variation de l'excentricité peut produire sur la température moyenne du globe se réduit à $0^{\circ},6$; cette quantité serait réduite encore à la moitié si l'on prenait pour la température de l'espace celle que Fourier lui assigne, savoir -50° à -60° .*

L'influence de la variation de l'excentricité est moins insignifiante pour les intensités extrêmes de la chaleur solaire dans les époques du périhélie et de l'aphélie; car, tandis que pour la valeur minima de l'excentricité, l'intensité de la chaleur solaire au périhélie est de 0,016 plus forte qu'à l'aphélie, que pour la valeur actuelle de l'excentricité cette différence est de 0,066, elle deviendrait, pour la valeur maxima, de 0,367 plus grande au périhélie qu'à l'aphélie, *c'est-à-dire de plus d'un tiers. On voit ainsi que la différence de la chaleur reçue par la terre dans les points extrêmes de son orbite, différence qui, dans l'état actuel, est environ $\frac{1}{15}$, pourrait d'un côté, en 24,000 ans environ, devenir quatre fois plus faible, tandis que d'un autre côté, elle peut avoir été autrefois jusqu'à cinq fois plus forte.* Une telle différence dans l'intensité du rayonnement solaire ne peut manquer de produire des contrastes de saisons très-considérables, surtout pour les régions de la terre où le périhélie coïncide avec le solstice d'été et l'aphé-

lie avec le solstice d'hiver. Si, à notre époque, l'influence de la plus ou moins grande distance du soleil se trouve compensée, et au-delà, par la distribution des terres et des mers sur les deux hémisphères, il est probable qu'il n'en serait plus de même lorsque l'excentricité étant plus de quatre fois plus grande, cette influence des distances solaires extrêmes serait cinq fois plus considérable.

Pour mieux comprendre ce résultat, il convient de développer l'influence du troisième élément cosmique, dont la variation peut être invoquée comme cause de changement de climat, savoir la *position de la ligne des apsides*.

IV

En effet, on sait que la ligne des apsides coïncide actuellement presque avec celle des solstices; car la terre passe par le périhélie environ le 1^{er} janvier, c'est-à-dire onze jours après le solstice d'hiver de notre hémisphère, de sorte que dans l'état actuel, la plus grande proximité du soleil coïncide avec notre hiver et avec l'été de l'hémisphère austral. Cependant cette coïncidence ne reste pas toujours la même; d'un côté la ligne des solstices a, par suite de la précession des équinoxes, un mouvement rétrograde sur l'écliptique, qui la fait tourner de 50",2 par an; d'un autre côté la ligne des apsides avance de 11",8 par an, de sorte qu'elle fait le tour de l'ellipse d'ouest à l'est dans une période de 110,000 ans environ; on voit donc que les points du solstice et du périhélie s'éloignent l'un de l'autre chaque année de 62", ce qui revient à dire que le périhélie fait le tour par rapport au point de solstice fixe en 21,000 ans à peu près, ainsi dans 10,000 ans environ, la terre se trouvera au périhélie pendant le solstice d'été de notre hémisphère.

Or l'excentricité de la terre étant à présent $\frac{1}{60}$, nous avons vu que la terre reçoit dans son périhélie $\frac{1}{15}$ de chaleur solaire de plus que dans son aphélie. Quoique cette différence soit assez considérable, elle reste cependant sans résultat pour la température moyenne de l'année des deux hémisphères.

res ; car la plus grande proximité de la terre se trouve exactement compensée par le temps moins long qu'elle séjourne dans cette partie de son orbite, par suite de la loi des aires. Il en résulte un théorème qu'on doit à Lambert et d'après lequel la quantité de chaleur que la terre reçoit dans une partie quelconque de l'année, est proportionnelle à l'angle décrit par le rayon vecteur pendant le même temps.

Ce théorème est exprimé par la formule ci-dessus, de laquelle il résulte que la quantité de chaleur reçue pendant le temps t que la terre décrit l'angle θ de son orbite, est :

$$A = \frac{\theta}{c}$$

Par conséquent, si l'on divise l'orbite terrestre par une ligne quelconque, passant par le soleil, la quantité de chaleur que la terre reçoit dans les deux parties, sera toujours la même, quelle que soit la direction qu'on donne à cette ligne. Donc si la terre, en allant de l'équinoxe d'automne à celui du printemps, se trouve plus près du soleil, elle parcourt aussi cette moitié de son orbite plus vite que l'autre moitié comprise entre l'équinoxe du printemps et celui d'automne, et la quantité de chaleur qu'elle reçoit est la même dans les deux moitiés. On doit en conclure que le déplacement de la ligne des apsides ne peut pas changer le climat des deux hémisphères, en tant que celui-ci dépend de la température moyenne.

Il en sera plus affecté pour ce qui concerne la distribution de la chaleur dans les différentes saisons ; car actuellement la chaleur estivale du mois le plus chaud doit être plus forte pour l'hémisphère sud que pour le nôtre, à cause de la plus grande proximité du soleil en janvier ; et sa température hivernale du mois de juillet doit être plus basse que celle du mois correspondant chez nous (janvier), parce que la terre se trouve alors près de son aphélie. En somme, le climat doit être plus extrême, toute condition du reste égale, sur l'hémisphère austral que sur le nôtre ; tandis que dans 10000 ans, lorsque notre été correspondra au périhélie, ce sera le contraire : les températures extrêmes seront plus fortes chez nous que sur l'autre hémisphère.

Cette conséquence importante du déplacement des apsides se combine avec la distribution actuelle des continents pour en augmenter ou en diminuer l'effet. Car dans notre époque, le contraste des saisons extrêmes se trouve notablement diminué pour l'hémisphère austral par le fait que sa plus grande partie est couverte d'eau, ce qui lui procure en général un climat maritime, en amoindrissant les contrastes de ses saisons. Pour notre hémisphère au contraire, la plus grande égalité des saisons qui résulte de la position actuelle du périhélie, est effacée par le caractère continental du climat que les grandes masses de terre ferme y produisent. C'est à tel point que d'après les recherches de Dove, la température de toute la surface terrestre est plus élevée au mois de juin qu'au mois de décembre, malgré la plus grande distance du soleil et à cause que la partie de la terre qui a alors le solstice d'été, est formée principalement de continents; l'hémisphère boréal chauffe ainsi davantage l'atmosphère que ne le fait l'océan de l'hémisphère austral pendant son été.

Dans 10000 ans au contraire, si l'on suppose que la distribution des continents et des mers soit encore la même qu'à présent, les deux causes conspireront et auront pour effet que nos étés seront considérablement plus chauds et nos hivers beaucoup plus froids qu'ils ne le sont actuellement et qu'ils ne le seront pour l'autre hémisphère. Car alors les rayons du soleil d'été, tout en parcourant une plus petite distance, tomberont sur les continents de l'hémisphère boréal, tandis que les rayons du soleil d'hiver feront un chemin plus oblique et plus long de $\frac{1}{30}$. On voit donc que si à notre époque, les deux causes, l'une cosmique et l'autre terrestre qui tendent à augmenter les contrastes des saisons extrêmes, se combattent pour les deux hémisphères, en égalisant leurs caractères de climats, il n'en sera pas de même dans 10000 ans; notre hémisphère aura un climat continental beaucoup plus prononcé, et dans l'hémisphère austral la différence des extrêmes se trouvera encore amoindrie davantage. Le contraste des deux hémisphères sera alors plus considérable que maintenant.

En résumant, on voit que le déplacement des apsides, tout en laissant la température moyenne constante, doit avoir ce-

pendant une influence notable sur la différence des températures extrêmes, surtout pour l'hémisphère boréal. Or cet élément climatérique est d'une importance très-considérable, non seulement pour la végétation et la vie organique en général, mais aussi comme nous l'avons déjà dit, au point de vue de l'extension des glaciers. Et comme la période de 21000 ans pour le mouvement relatif des apsides n'est pas trop vaste par rapport aux immenses époques géologiques, on conçoit que les changements de climats dus à cette cause soient revenus assez fréquemment.

Pour préciser un peu les époques, il suffit de dire que l'an 9250 avant notre ère ainsi que l'an 11700 de notre ère, sont des années de maxima, c'est-à-dire où le périhélie coïncidant avec notre solstice d'été, la différence entre les saisons extrêmes de notre hémisphère est la plus forte, tandis que les années 19700 avant J.-Ch. et 1250 de notre ère, sont des minima, c'est-à-dire où la terre passant au périhélie au moment de notre solstice d'hiver, les contrastes du climat continental de notre hémisphère sont le plus amoindris.

Il nous reste à évaluer la quantité des effets produits. Nous avons déjà vu que pour les jours du périhélie et de l'aphélie la différence de l'action solaire est de $\frac{1}{15}$; plus exactement on trouve pour le rapport entre la chaleur reçue le 1 janvier et celle du 2 juillet 1,069. Si l'on calcule les sommes de chaleur reçues par la terre pendant le temps du 17 décembre — 16 janvier (qui correspond au périhélie), et pendant le temps du 17 juin — 17 juillet (qui répond à l'aphélie), on trouve que le rapport entre ces quantités est encore 1,068. Or si l'on évalue de nouveau l'action solaire totale à 200° , on obtiendrait pour la différence de l'effet du soleil dans ces deux époques 14° . En se servant pour la température de l'espace de l'évaluation minimum de -56° , et en réduisant ainsi l'action solaire à 110° , on trouverait toujours 7° à 8° pour la différence de l'action solaire pendant ces deux époques. C'est donc de cette quantité au moins que nos hivers seraient plus froids, et nos étés plus chauds, si le périhélie coïncidait avec le solstice d'été et non pas avec celui d'hiver comme maintenant.

On comprend que cet effet augmente avec la valeur de

l'excentricité, et que si les intensités de la chaleur solaire aux époques de périhélie et de l'aphélie ne différaient pas seulement de $\frac{1}{15}$ comme à présent, mais de $\frac{1}{5}$, les étés et les hivers de chaque hémisphère seraient encore beaucoup plus différents, selon que le périhélie coïnciderait avec leur solstice d'été ou avec celui d'hiver. On voit ainsi que la variation de l'excentricité et celle de la position des apsides se combinent de manière à produire un effet maximum lorsque le solstice d'été coïncide avec le périhélie pendant que l'excentricité de l'orbite a sa plus grande valeur. Dans ce cas, le contraste des saisons extrêmes peut atteindre une valeur dont nous n'avons pas d'équivalent dans l'état actuel du globe, même à l'intérieur des continents où la différence des températures est la plus forte.

Si nous résumons les résultats des développements qui précèdent, nous voyons que les variations séculaires des différents éléments planétaires sont presque sans effets sur la chaleur totale du globe et même sur les températures moyennes de ses différentes régions. La variation de l'obliquité de l'écliptique ne change la température moyenne de nos régions qu'à peine d'un degré, et celle des régions polaires de 4° , (dans d'autres suppositions, de 7° à 8° .) La variation de l'excentricité ne peut modifier la température moyenne du globe que d'une fraction de degré, et la position des apsides n'a aucune influence quelconque sur cet élément. On peut donc dire que tous les phénomènes de la physique du globe qui dépendent essentiellement de la température annuelle moyenne, ne sont point influencés par ces causes cosmiques d'une manière sensible, à l'exception toutefois des régions polaires, où la plus grande obliquité de l'écliptique peut élever la température moyenne d'une manière suffisante, pour expliquer en partie la végétation qui a régné autrefois en Islande et en Groenland. Par contre, la distribution de la température suivant les différentes saisons et l'écart des températures extrêmes doivent varier considérablement avec les éléments astronomiques du globe. Nous avons vu que la variation de l'inclinaison de l'écliptique peut augmenter le contraste des saisons extrêmes de nos régions de 2 à 3° . Le déplacement

séculaire de la ligne des apsides peut produire, sous ce rapport, un effet trois fois plus fort, même avec la valeur actuelle de l'excentricité, et dans les époques où cet élément atteint sa plus grande valeur, la coïncidence du solstice d'été avec le périhélie doit amener, pour l'hémisphère en question, une différence de température très-considérable entre les saisons extrêmes, dépassant celle qui existe à présent de plus de 30°.

Malgré la chaleur estivale très-forte qui en résulterait pour nos régions et même pour des latitudes plus septentrionales, il nous semble impossible d'expliquer par cette seule cause toutes les différences des climats paléontologiques, et surtout l'époque glaciaire. Il faut nécessairement, pour en rendre compte, avoir recours à des causes purement terrestres, à des changements de niveau considérables s'étendant sur de vastes régions et aux modifications fondamentales qui en résultent pour la distribution des continents et des mers.

V

Les soulèvements et affaissements alternatifs de vastes parties de la surface terrestre, dont nous trouvons partout les preuves dans l'étude des roches neptuniennes et que nous voyons du reste se continuer sous nos yeux, par exemple en Scandinavie, ont été invoqués dernièrement au sein de la Société royale de Londres par M. John Evans, pour rendre plausible non pas un changement de direction de l'axe terrestre dans l'espace, mais un déplacement des pôles sur la surface du globe. On sait que Laplace a nié formellement la possibilité d'un tel déplacement : « Toute hypothèse, dit-il dans le V^e volume de la *Mécanique*, page 17, fondée sur un déplacement considérable des pôles à la surface de la terre, doit être rejetée comme incompatible avec la propriété dont jouit la figure terrestre, de différer peu de celle que prendrait sa surface en devenant fluide. » D'autres astronomes et géomètres sont arrivés après Laplace au même résultat, savoir qu'aucun soulèvement de montagnes ne pourrait changer sensiblement l'axe de rotation du globe. Or, M. Evans pré-

tend que cette invariabilité absolue de l'axe ne peut se démontrer qu'en envisageant la terre comme un corps solide, dont une partie de la surface se trouve couverte d'eau; mais que, si l'on envisage le globe comme un corps fluide, formé de matière incandescente, et recouvert d'une écorce solide, relativement mince, des soulèvements ou des affaissements considérables, produits dans cette écorce par des causes quelconques, doivent modifier la position relative du noyau fluide et de son écorce solide, quand même ils ne changeraient pas la position de l'axe général dans l'espace, et par conséquent déplacer les pôles sur la surface terrestre. En effet, si l'on conçoit une sphère creuse solide, d'une épaisseur et d'une densité uniformes, remplie d'une matière fluide, *sur laquelle l'écorce peut se mouvoir librement*, et que le tout soit mis en mouvement de rotation, il est évident que l'axe de rotation du noyau fluide et de son écorce solide se mettront d'accord et resteront en coïncidence aussi longtemps que l'équilibre de cette écorce ne sera pas troublé. Si cela arrivait, par exemple, par le fait de l'adjonction d'une masse additionnelle quelque part dans les latitudes moyennes, non-seulement le centre de gravité de tout le système serait légèrement déplacé et par suite aussi l'axe général de rotation tant soit peu changé; mais encore la force centrifuge de cette masse, faisant saillie, par sa tendance de s'éloigner autant que possible du centre de rotation, ferait glisser l'écorce sur son noyau fluide jusqu'à ce qu'elle se trouve à l'équateur. Il s'ensuivrait naturellement que le point occupé auparavant par le pôle descendrait d'autant vers l'équateur, et qu'un autre point, distant du premier pôle d'autant de degrés que la région, où le soulèvement a eu lieu, l'était de l'équateur, viendrait occuper le nouveau pôle. On comprend également que si, au lieu d'un soulèvement, il se produisait quelque part un affaissement ou une diminution de matière (par suite de courants marins, etc.), l'amoindrissement de la force centrifuge qui en résulterait pour ce point, lui imprimerait la tendance de s'approcher du pôle et causerait ainsi un mouvement de l'écorce dans le sens contraire.

Pour démontrer ces effets par l'expérience, M. Evans a fait construire, suivant l'idée de M. Francis Galton, un appa-

reil composé d'une roue libre de tourner autour d'un axe, fixé lui-même dans un cadre mobile autour d'un axe parallèle à un des rayons de la roue. Dans la périphérie de la roue il y a un certain nombre de vis qui peuvent être sorties ou rentrées plus ou moins, à l'instar des balanciers compensés des chronomètres. Après avoir ajusté ces vis de manière à mettre la roue d'équilibre, elle conserve sa position sur son axe, si l'on met le cadre en rotation. Mais du moment qu'on sort une des vis, elle se trouve après quelques révolutions dans la région équatoriale; et si l'on enfonce, au contraire, des vis dans la région équatoriale, elles se trouveront bientôt près des pôles.

On ne peut pas nier que par cette expérience aussi bien que par le raisonnement que nous avons rapporté, il ne soit prouvé que *si la terre était une sphère fluide* et couverte d'une écorce solide d'une épaisseur de 60.-80 kilomètres, des soulèvements de continents, d'une hauteur moyenne de 1000^m, tels qu'ils existent, auraient dû causer des déplacements des pôles très-considérables et largement suffisants pour expliquer tous les changements de climats que les faits géologiques accusent.

Par contre, nous ne pouvons pas admettre avec M. Evans, que si tout cela est vrai pour une sphère, il l'est aussi pour un sphéroïde aussi peu aplati que la terre, « avec cette seule différence, dit M. Evans, que dans le cas du mouvement d'une écorce sphéroïdale sur un noyau fluide de forme également sphéroïdale, chaque partie de sa structure intérieure doit être plus ou moins forcée ou dérangée, puisque la courbure doit se modifier à chaque point. »

Or, il nous semble que *cette différence est capitale*, et que la résistance qu'une écorce solide de la rigidité de nos roches granitiques et d'une épaisseur de 80 kilom. offrirait à une déformation telle que les parties polaires pussent s'éloigner du centre de plus de 10 kilom., serait tellement énorme, qu'il faudrait un soulèvement de vastes continents, non pas de 1 kilom., mais de *dix* kilom., pour la vaincre. Si on laisse même entièrement de côté la question du frottement causé par le glissement d'une pareille écorce sur un milieu qui, à la limite,

aura peut-être une consistance visqueuse, et qu'on ne tienne compte que de la résistance d'une masse solide aussi rigide et aussi épaisse, et en même temps de la différence de la pesanteur que ses différentes parties, en changeant de latitude, auraient à vaincre, différence qui va jusqu'à $\frac{1}{570}$, on arrive à une force nécessaire bien plus grande qu'elle ne peut naître par le surcroît de la force centrifuge, par suite d'un soulèvement ou affaissement allant jusqu'à $\frac{1}{80}$ de l'épaisseur de l'écorce et jusqu'au $\frac{1}{6400}$ du rayon du sphéroïde. On peut s'imaginer cette force aussi grande que possible, (et il serait difficile de la préciser d'une manière générale, parce qu'elle dépend à la fois de la hauteur du soulèvement, de la masse soulevée et de la latitude sous laquelle elle a eu lieu); il faut toujours admettre, qu'elle parviendra plutôt à vaincre la cohérence des matières qui forment la montagne ou le continent soulevé, qu'à surmonter la rigidité de toute la masse de l'écorce terrestre; de sorte que sous son influence, il adviendrait que la masse soulevée se détacherait et gagnerait la latitude où la force centrifuge serait égale à celle qu'elle aurait éprouvée par le fait de son soulèvement, plutôt que de voir toute l'écorce entraînée dans un mouvement de glissement; ce mouvement en la déformant risquerait de la briser tout entière.

Si l'on reste dans les conditions réelles de notre globe, qu'on se représente que la hauteur moyenne des continents ne surpasse pas mille mètres, ce qui est le 20^{me} de l'excès du rayon de l'équateur sur celui des pôles et probablement la 80^{me} partie de l'épaisseur de l'écorce rigide, on doit se convaincre que le soulèvement de ces continents, loin de pouvoir abaisser le pôle de 45°, comme le veut M. Evans, ne saurait déplacer l'axe que d'une faible quantité, de quelques degrés tout au plus. Cela ne suffirait nullement pour expliquer l'existence antérieure d'un climat subtropical dans les régions polaires actuelles, tout en fournissant cependant l'explication des curieux changements que l'astronome royal a observés dans la position du cercle méridien de Greenwich par rapport aux étoiles, tandis qu'il restait invariable par rapport aux collimateurs; cela ne peut s'expliquer, d'après M. Airy, qu'en admettant ou une oscillation du sol par rapport à la terre en

général, ou un changement de position dans l'axe de rotation.

Nous voyons ainsi, pour résumer, que les variations dans la position des pôles à la surface du globe, si elles existent, ne suffisent pas, aussi peu que les variations de l'inclinaison de l'écliptique et de l'excentricité, pour rendre compte des changements de climats qui se sont produits dans la suite des époques géologiques. Il est probable que les soulèvements ou les affaissements successifs de certaines régions terrestres ont changé la distribution de la chaleur à la surface du globe, bien moins par l'effet indirect qu'ils ont pu avoir sur la position des pôles, que par les conséquences physiques et météorologiques directes; car, non seulement dans nos latitudes la température moyenne de l'année s'abaisse déjà de 5° à une élévation de 800^m et de 10° par une élévation de 1,700^m; mais encore les changements que des soulèvements ou des affaissements produisent dans la distribution des eaux et des terres, dans la direction des courants marins et des vents dominants, sont des causes puissantes pour faire varier les climats.

Comme résultat général de cette étude, on peut dire que les deux opinions qui ont été soutenues jusqu'à présent et dont l'une veut attribuer tous les changements climatiques, survenus sur la terre, à des causes cosmiques ou géodésiques, tandis que l'autre nie toute influence de ces variations, ne sont pas conformes à la réalité. Nous avons reconnu l'efficacité de quelques-uns de ces éléments, principalement sur la différence des températures extrêmes. Mais en tâchant de préciser leur effet en chiffres, nous nous sommes convaincus qu'ils sont loin de suffire à l'explication complète des changements climatiques constatés et qu'il faut attribuer la plus large part de ces effets aux causes purement terrestres. Enfin il est naturel que les plus grands changements climatiques aient été produits par la combinaison de ces deux genres de causes.

