Académie royale
des
Sciences d'Outre-Mer

CLASSE DES SCIENCES NATURELLES
ET MÉDICALES

Mémoires in-8°. Nouvelle série.
Tome XIII, fasc. 6 et dernier.

Koninklijke Academie
voor
Overzeese Wetenschappen

KLASSE VOOR NATUUR- EN
GENEESKUNDIGE WETENSCHAPPEN

Verhandelingen in-8°. Nieuwe reeks
Boek XIII, aflev. 6 en laatste.

Le caractère tropical des paléoclimats à cycles conjoints de 11 et 21 000 ans et ses causes : migration des pôles ou dérive des continents

PAR

Étienne-A. BERNARD

Correspondant de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer
Directeur de l'Institut belge
pour l'Encouragement de la Recherche scientifique
Outre-Mer (IBERSOM)

80A, rue de Livourne,
BRUXELLES 5

Livornostraat, 80A,
BRUSSEL 5

1962

PRIX :
PRIJS : F 80

ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES D'OUTRE-MER

MÉMOIRES

KONINKLIJKE ACADEMIE VOOR OVERZEESE WETENSCHAPPEN

VERHANDELINGEN

CLASSE DES SCIENCES NATURELLES ET MÉDICALES

KLASSE VOOR NATUUR- EN GENEESKUNDIGE WETENSCHAPPEN

TABLE DES MÉMOIRES CONTENUS DANS LE TOME XIII

LIJST DER VERHANDELINGEN OPGENOMEN IN BOEK XIII

1. Contributions à la pathologie hépatique du Congolais (I. L'hépatosplénomégalie de l'adulte congolais ; II. Les cirrhoses du Congolais; III. Le cancer primitif de foie au Congo) (95 pages, 2 figures, 17 photos, 1962) ; par M. P. De Smet.

2. Monographie des Menispermaceae africaines (315 pages, 31 figures, 1962) ; par G. Troupin.

3. Matériaux pour servir à l'étude de la préhistoire de l'Uele. Le dallage d'Api. — Le mégalithe d'Obeledi (48 pages, 8 figures 4 cartes, 8 photos, 1961) ; par P. Leroy.

4. Étude biologique et écologique de *glossina morsitans* WESTW. dans la région du Bugesera (Rwanda) (115 pages, 20 figures, 2 cartes hors-texte, 1962) ; par L. Van den Berghe et F.-L. Lambrecht.

5. Étude comparative du développement psychomoteur, pendant les six premiers mois, de 105 nourrissons blancs (Bruxelles) et de 78 nourrissons noirs (Johannesburg) (36 pp., 10 figures, 1962); par J. Falmagne.

6. Le caractère tropical des paléoclimats à cycles conjoints de 11 et 21 000 ans et ses causes : migration des pôles ou dérive des continents (60 pages, 1 figure, 1962) ; par E.-A. Bernard.

ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES D'OUTRE-MER

Classe des Sciences naturelles et médicales

MÉMOIRES

KONINKLIJKE ACADEMIE VOOR OVERZEESE WETENSCHAPPEN

Klasse voor Natuur- en Geneeskundige Wetenschappen

VERHANDELINGEN

Nouvelle série — Nieuwe reeks

in-8° — XIII — 1961-1962

80A, Rue de Livourne, BRUXELLES 5 | **Livornostraat, 80A BRUSSEL 5**

1962

IMPRIMERIE J. DUCULOT
S. A.
GEMBLOUX

Le caractère tropical des paléoclimats à cycles conjoints de 11 et 21 000 ans et ses causes : migration des pôles ou dérive des continents

PAR

Étienne-A. BERNARD

CORRESPONDANT DE L'ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES D'OUTRE-MER
DIRECTEUR DE L'INSTITUT BELGE
POUR L'ENCOURAGEMENT DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
OUTRE-MER (IBERSOM)

Mémoire présenté à la séance du 18 mars 1961.

RÉSUMÉ

On établit d'abord le caractère tropical de certains paléoclimats de l'histoire géologique ayant fixé dans des dépôts rythmiques, faits de varves lacustres ou marines, le cycle précessionnel de 21 000 ans et le cycle des taches solaires de 11 ans. L'argumentation consiste à réinterpréter ces dépôts dans le cadre de la théorie astronomique des phases paléoclimatiques du Quaternaire en zone tropicale, théorie élaborée par l'auteur dans un mémoire précédent. Les dépôts étudiés par KORN dans le Dévonien supérieur et le Carbonifère inférieur de Thuringe sont à cet égard particulièrement significatifs et permettent de conclure à la position équatoriale de la Thuringe à l'époque des dépots étudiés.

De telles variations de latitude au sens astronomique, sur l'ellipsoïde terrestre, ne peuvent résulter que d'une migration des pôles, d'une dérive des continents ou être l'effet de l'action conjuguée de ces deux causes. Le problème de la migration des pôles est ensuite discuté. On montre que les redistributions de masses à la surface du Globe dans l'évolution géologique ne peuvent provoquer une disjonction appréciable entre l'axe instantané de rotation et l'axe d'inertie maxima, du fait que le réajustement isostatique introduit un facteur de l'ordre du millième dans la valeur de l'angle de disjonction. Des déplacements appréciables des pôles sont donc difficilement concevables. On est ainsi forcé d'admettre que les continents ont subi une dérive importante en latitude depuis le Carbonifère inférieur. Un paragraphe final examine l'insuffisance des autres causes paléoclimatiques pour expliquer les faits constatés. On fournit à cet effet un système de 5 équations qui résument l'argumentation et qui synthétisent la paléoclimatologie physique.

SAMENVATTING

Schrijver bepaalt vooreerst het tropisch karakter van sommige palaeoklimaten uit de geologische geschiedenis, die door ritmisch herhaalde afzettingen van meer-of zeevarven, de praecessiecyclus van 21 000 jaar en de zonnevlekkencyclus van 11 jaar hebben vastgelegd. Deze afzettingen, verklaard in het bestek van de sterrekundige leer omtrent de palaeoklimatologische fazen van het Kwartair in de tropische gordel, staven de theorie die reeds in een voorafgaande verhandeling door de auteur werd uitgewerkt.

De door KORN bestudeerde afzettingen in het Boven-Devoon en het Onder-Karboon van Thüringen, zijn uiterst kenmerkend in dit opzicht, en leiden tot het besluit dat Thüringen ten tijde van de onderhavige afzettingen een equatoriale ligging had. Zulke variaties in de astronomische breedteligging op de aardellipsoïde kunnen enkel toegeschreven worden, enerzijds aan een verplaatsing van de polen, anderzijds aan een afdrijving van de Continenten, of aan de werking van beide oorzaken tegelijk. Vervolgens wordt het probleem van de polenverplaatsing besproken. Schrijver toont aan hoe, in de geologische ontwikkeling, de herverdeling van de massa's over de aardoppervlakte geen merkbare scheiding kunnen teweegbrengen tussen de ogenblikkelijke omwentelingsas en de as van de maximum-inertie ; immers door de isostatische compensatie wordt een factor ingevoerd die slechts een duizendste van de waarde vertegenwoordigt van de hoek gevormd door die twee assen. Aanzienlijke verplaatsingen van de polen zijn dus uitgesloten. Men moet bijgevolg noodzakelijk aanvaarden, dat de Continenten een merkwaardige afdrijving in breedteligging hebben ondergaan, sedert het Onder-Karboon.

In een laastste paragraaf wordt de ontoereikendheid van de andere palaeoklimatologische oorzaken onderzocht om de vastgestelde feiten te verklaren. Te dien einde wordt een stelsel van vijf vergelijkingen voorgesteld die de bewijsvoering en tevens de fysische palaeoklimatologie samenvatten.

SUMMARY.

In the Higher Devonian and Lower Carboniferous varved deposits of Thuringe, studied by KORN, the precessional 21 000 years cycle and the Il years sunspots cycle can be recognized.

Using his recently published astronomical theory of phase evolution of quarternary paleoclimats in the tropics and reinterpreting the data, the author is able to show that the deposits have a typical tropical character and that, therefore, the site of Thuringe must have, at the time, been situated in the equatorial belt. This variation in latitude may have been caused by a migration of the poles, by a continental drift or by a combination of both these effects.

The problem of pole migration is discussed. It is shown that a redistribution of masses at the surface of the earth, due to geological evolution, cannot cause an appreciable separation between the instantaneous axis of rotation and the axis of maximum inertia, because the isostatic compensation reduces the otherwise expected angle between the two axis, by a factor of about one thousand. Therefore, great displacements of the poles cannot materialise. The only possibility which is left is the occurrence of a large contniental drift in latitude since the Lower Carboniferous Age.

In a final paragraph, 5 equations are established to summarize physical paleoclimatic evolution. These enable the author to demonstrate that circumstances, other than continental drift, are insufficient to explain the observations.

Le caractère tropical des paléoclimats à cycles conjoints de 11 et 21 000 ans et ses causes : migration des pôles ou dérive des continents.

I. Introduction.

En élaborant la théorie astronomique des phases climatiques quaternaires de la zone tropicale, théorie que nous avons présentée récemment à l'A.R.S.O.M. [2; 3]*, nous avons eu l'attention attirée sur l'existence du cycle astronomique de 21 000 ans dans certaines formations géologiques occupant des latitudes non tropicales. Ce fait entraîne des conséquences d'une grande portée géologique et géophysique, quand on l'analyse dans le cadre de la théorie astronomique. Nous allons montrer, en effet, que seule une région occupant une position intertropicale, peut voir son évolution paléoclimatique bien rythmée par le cycle de 21 000 ans et inscrire nettement ce cycle dans sa stratigraphie.

Les formations géologiques susceptibles d'attester l'existence du cycle de 21 000 ans, sont nécessairement, dans les conditions actuelles des méthodes géo-chronologiques, des dépôts sédimentaires formés de varves dénombrables où la durée du cycle peut être comptée avec précision. C'est pourquoi nous serons amené à commenter en détail certaines formations varvées, soit déposées en estuaire marin, soit d'origine lacustre, et au sein desquelles le cycle précessionnel a été observé. L'analyse de la structure des couches varvées de tels dépôts et celle des varves elles-mêmes, entraînent une forte présomption en faveur de la thèse admettant la réalisation de ces formations en zone tropicale à pluies de convection thermique. Dans un exemple revêtant une signification toute particulière et relatif à des dépôts formés en Thuringe, à 50° de latitude nord, au Dévonien supérieur et au

* Les chiffres entre [ ] renvoient à la bibliographie *in fine*.

Carbonifère inférieur, des couches constituées de varves à quatre feuillets établissent l'existence du régime pluviométrique équatorial à deux saisons de fortes pluies et deux saisons de moindres pluies. D'autre part, des alternances de couches à varves bifeuilletées et de couches à varves quadrifeuilletées attestent des alternances entre des paléoclimats à régime pluviométrique tropical à simple périodicité et des paléoclimats à régime pluviométrique équatorial à double périodicité.

Or, la théorie astronomique du climat d'insolation des latitudes permet de définir une latitude privilégiée, l'équateur calorifique, pour laquelle le contraste entre les insolations semestrielles d'été et d'hiver s'annule. La latitude de l'équateur calorifique est déterminée par la valeur des trois éléments : l'excentricité e de l'orbite terrestre, l'obliquité ϵ et l'angle Π de position du périhélie par rapport au point vernal correspondant. Les variations séculaires de ces trois éléments provoquent un balancement dans le temps de l'équateur calorifique autour de l'équateur géographique avec la périodicité moyenne de Π qui est d'environ 21 000 ans. Ce balancement peut s'effectuer entre les latitudes extrêmes de 11°N et 11°S aux époques de plus forte excentricité. Une latitude appartenant à la zone balayée par l'équateur calorifique ou marginalement voisine de cette zone, jouit d'un climat équatorial à régime pluviométrique doublement périodique quand l'équateur calorifique passe sur cette latitude où quand il s'en approche suffisamment. Au contraire, lorsque, dans son balancement latitudinal, l'équateur calorifique atteint sa position la plus éloignée de la latitude considérée, celle-ci subit un climat tropical à saison estivale de fortes pluies et à longue sécheresse hivernale. On peut donc voir dans les alternances signalées de couches à varves bifeuilletées et de couches à varves quadrifeuilletées de certains dépôts géologiques, le reflet du balancement de l'équateur calorifique autour de l'équateur géographique aux époques où la sédimentation de ces couches s'est réalisée.

La présence du cycle des tâches solaires de 11 ans dans les dépôts à varves étudiés apporte un argument supplémentaire en faveur du caractère intertropical des paléoclimats sous l'effet desquels les formations en cause se sont réalisées.

Or, ces formations occupent actuellement des latitudes nettement extratropicales. On est donc obligé de conclure que d'impor-

tantes variations de latitude ont dû affecter les continents au cours de l'évolution géologique. Les flores fossiles découvertes aux latitudes polaires fournissent une preuve directe de cette assertion.

La conclusion ainsi acquise touchant les variations de latitude des aires continentales, nous oblige ensuite à réexaminer les problèmes complexes de la cause de telles variations : migration des pôles ou dérive des continents ? A cette occasion, nous serons amené à fournir des arguments géophysiques, à notre connaissance nouveaux, contre la possibilité d'une divagation appréciable des pôles au cours des époques géologiques.

Nous devrons donc admettre que les importantes variations des latitudes, établies par les dépôts à cycles de 11 et de 21 000 ans, résultent essentiellement d'une dérive en latitude des continents.

Cette conclusion atteint l'objectif assigné à ce mémoire : valider ou invalider, à partir de faits aussi probants que possible, revus sous la lumière de la théorie astronomique des paléoclimats, l'hypothèse si controversée du mobilisme des continents. L'étude des causes et des modalités de la dérive continentale sort du cadre de ce mémoire. Une telle étude couvre d'ailleurs un champ scientifique extrêmement vaste, allant de l'astronomie à la biologie. Elle ne peut progresser que par les efforts conjugués de nombreux spécialistes s'informant mutuellement de leurs travaux ou confrontant les résultats de leurs recherches à l'occasion de colloques.

* * *

Au cours de l'élaboration de ce mémoire, nous avons eu l'avantage de recevoir les avis de notre confrère à l'A.R.S.O.M., J. LEBRUN, professeur à l'Université de Louvain et de M. F. STOCKMANS de l'Institut des Sciences Naturelles à Bruxelles, sur des questions de paléoécologie botanique abordées dans ce mémoire. Nous avons bénéficié aussi des avis de nos confrères MM. F. BULTOT, L. CAHEN, P. FOURMARIER et J. LEPERSONNE qui ont accepté de lire notre manuscrit et qui nous ont fait part d'utiles remarques. Que tous trouvent ici l'expression de nos remerciements pour l'aide qu'ils nous ont si obligeamment apportée.

II. Le caractère tropical des paléoclimats à cycle de 21 000 ans.

1. *Rappels de la théorie astronomique des pluviaux et interpluviaux* (1).

Les sept planètes principales exercent des actions gravifiques qui perturbent séculairement les éléments de l'orbite terrestre. Trois de ces éléments déterminent le climat d'insolation des diverses latitudes du Globe : l'obliquité ϵ ou l'inclinaison de l'axe terrestre sur le plan de l'écliptique, l'excentricité e de l'orbite elliptique de la Terre autour du Soleil et l'angle de position Π du périhélie par rapport au point vernal γ de l'époque correspondante. Les variations séculaires de ces trois éléments ont été fournies par Milankovitch [31] pour les derniers 600 000 ans. Elles ont été recalculées plus récemment pour le dernier million d'années par les astronomes de Yale, Brouwer et van Woerkom [6 ; 40]. Les résultats établissent que l'obliquité ϵ varie entre 21°8 et 24°4 avec une période de 41 000 ans. L'excentricité e oscille entre 0 et 0,053 avec une période assez variable, de l'ordre de 100 000 ans. L'angle Π balaye 360° en une période moyenne de 21 000 ans, mais celle-ci peut osciller dans l'intervalle assez large de 13 500 à 29 000 ans. Le mouvement du périhélie, relativement au point vernal correspondant γ, résulte de la composition de deux mouvements absolus par rapport au point vernal γ_0 de l'époque initiale choisie. Le premier est celui de la précession générale, mouvement rétrograde de γ relativement à γ_0 sur le plan de l'orbite, une rotation complète s'effectuant en 25 700 ans. Le second consiste en un déplacement du périhélie par rapport à γ_0 dans le sens direct, avec une période irrégulière de 96 600 ans en moyenne [3, fig. 1 et 6].

Nous avons montré que la période de l'élément Π joue un rôle important dans la théorie des variations séculaires du climat d'insolation des latitudes intertropicales et des alternances de phases pluvieuses ou d'aridification que ces variations provoquent [3]. Rappelons ici les idées essentielles de notre théorie.

(1) Cfr [3].

MILANKOVITCH [31 ; 32] a défini un parallèle particulier φ_e appelé *équateur calorifique*, qui est celui pour lequel le contraste entre les insolations des semestres calorifiques d'été et d'hiver s'annule. L'équateur calorifique balance en latitude au cours du temps, de part et d'autre de l'équateur géographique, avec une amplitude proportionnelle à l'excentricité e, la période d'un cycle complet de balancement étant celle de Π. Ces faits découlent de l'équation simple ci-après qui définit φ_e

$$\operatorname{tg} \varphi_e = \frac{4e}{\pi} \frac{\sin \Pi}{\sin \epsilon} \qquad (1)$$

Au cours d'un cycle Π, les fluctuations de $\sin \epsilon$ restent faibles puisqu'elles ne peuvent varier qu'entre $\sin 21°8 = 0{,}3714$ et $\sin 24°4 = 0{,}4131$. Les variations de φ_e sont donc déterminées principalement par celles de e et de Π. En adoptant les valeurs extrêmes réalisables pour ϵ et e au cours du Quaternaire, on trouve que l'oscillation de φ_e est restée comprise entre les parallèles de $+ 10°45'$ et $- 10°45'$. Les époques où Π passe par $90°$ ou $270°$ sont celles où $\sin \Pi$ prend ses valeurs extrêmes $+ 1$ ou à $- 1$. L'équateur calorifique atteint à ces époques les positions limites nord et sud $\varphi_{e,M}$ et $- \varphi_{e,M}$ de son balancement.

L'époque $\Pi = 90°$ correspond au passage du périhélie au solstice d'hiver. Ce cas est voisin des conditions actuelles où Π_0 vaut $102°$ (1950). L'équateur calorifique atteint sa position extrême nord. Alors que cette latitude et ses voisines jouissent d'un régime d'insolation équatorial, à double périodicité et d'amplitude très amortie, l'équateur géographique et les latitudes australes subissent un régime d'insolation de caractère tropical, aux contrastes solsticiaux accrus. Le solstice propre à l'été de l'hémisphère sud se produit en effet au moment où la distance Terre-Soleil est la plus courte. L'insolation solsticiale correspondante, aux diverses latitudes sud, est augmentée par l'effet conjugué des deux lois connues : rayonnement proportionnel au cosinus de la distance zénithale du Soleil et inversément proportionnel au carré de la distance de la source rayonnante. Au contraire, l'insolation d'hiver est déficitaire.

L'époque $\Pi = 270°$ correspond au passage du périhélie au solstice d'été. L'équateur calorifique est alors rejeté à sa latitude australe la plus haute. Celle-ci connaît un régime d'insolation équatorial alors que l'équateur géographique et les latitudes

nord subissent un régime d'insolation au caractère tropical amplifié.

Aux latitudes $\pm \varphi_{e,M}$ ou extérieures à l'intervalle $(-\varphi_{e,M}, +\varphi_{e,M})$, les alternances entre les régimes d'insolation à allure plus équatoriale ou plus tropicale portent sur des intervalles de temps égaux à 10 500 ans en moyenne, soit à une demi-période de Π. Aux latitudes voisines de l'équateur géographique, ces alternances suivent un rythme deux fois plus rapide et se rapportent à des durées moyennes de 5 250 ans puisque l'équateur calorifique reprend deux fois la position de l'équateur géographique au cours du cycle de 21 000 ans. L'évolution des régimes d'insolation des latitudes $\varphi_{e,M}$ et de l'équateur est donc différente. Cette distinction est d'autant plus nette que $\varphi_{e,M}$ est plus élevé en valeur absolue, c'est-à-dire que l'excentricité e est plus grande. Aux époques de faible excentricité, $\varphi_{e,M}$ et $-\varphi_{e,M}$ se rapprochent de l'équateur et la distinction s'évanouit.

Dans son balancement précessionnel autour de l'équateur, l'équateur calorifique entraîne avec lui le système des régimes d'insolation des latitudes et le système des zones climatiques lié à ces régimes. Ces zones glissent ainsi à la surface du Globe en balayant des latitudes intertropicales selon un mouvement de va et vient commandé par le cycle Π et dont l'amplitude est régie par l'excentricité e. Ce balancement séculaire des climats d'insolation est presqu'exclusivement déterminé en zone tropicale par les variations séculaires de Π et de e. Il entraîne un balancement concomitant du régime thermique des latitudes, la température étant sous les Tropiques un élément étroitement tributaire de l'insolation.

Ce rythme précessionnel du climat thermique engendre un rythme du climat pluviométrique des latitudes car, en régions intertropicales, les processus de convection thermique régissent au premier titre la formation des pluies.

Ces rythmes climatiques commandés par la périodicité de l'élément Π modulent en fait un cycle climatique plus essentiel car planétaire, qui est déterminé par le cycle des variations de l'obliquité ϵ à 41 000 ans de période. Les rythmes climatiques à 21 000 ans de période, engendrés par le cycle de Π, résultent du *balancement* de l'équateur calorifique autour de l'équateur géographique et provoquent donc des alternances de contraste

entre les latitudes tropicales des hémisphères nord et sud. Le cycle climatique planétaire que ces rythmes modulent revêt au contraire le caractère d'une *pulsation* thermique du climat terrestre, engendrée aux hautes latitudes et altérant fortement la pluviométrie en régions tropicales par l'intermédiaire d'une pulsation thermique des océans. Les processus d'action du cycle de l'obliquité sont les suivants.

Aux époques où ϵ est maximé, les latitudes polaires jouissent d'un excès d'insolation estival provoquant la fonte complète des neiges au cours de la saison chaude. Un état d'interglaciation s'installe à ces latitudes. Cette interglaciation est maximale lorsque le solstice d'été de l'hémisphère considéré passe au périhélie ($\Pi = 270^{\circ}$ dans l'H.N., $\Pi = 90^{\circ}$ dans l'H.S). L'hémisphère opposé connaît alors une interglaciation mitigée. Le gradient thermique méridien entre les basses et les hautes latitudes est plus faible. Ainsi que la circulation atmosphérique, la circulation océanique est ralentie et les océans tropicaux sont plus chauds, spécialement durant l'été de l'hémisphère à grande interglaciation. L'évaporation plus active de ces océans alimente bien en vapeur d'eau le cycle hydrologique externe océans-continents. Les latitudes intertropicales à haute insolation d'été bénéficient alors de pluies d'averses intenses pour deux raisons : l'effet de mousson que traduit le cycle externe est intensifié, tandis que le cycle hydrologique interne — pluies de convection thermique, réévaporation — est bien nourri en vapeur d'eau et en énergie. La saison d'hiver de ces latitudes est au contraire rendue très sèche, par suite du déficit d'insolation qui la caractérise. Nous appelons *displuvial* le régime pluviométrique aux contrastes saisonniers accrus qui s'installe alors à ces latitudes. Dans l'hémisphère opposé, les latitudes voisines de l'équateur calorifique connaissent au contraire un régime pluviométrique abondant et régulier à deux maxima équinoxiaux. Nous caractérisons un tel régime par l'expression d'*isopluvial.*

Aux époques où ϵ est minimé, le déficit estival d'insolation des hautes latitudes favorise l'accumulation des neiges en calotte glaciaire. Cette accumulation est maximum aux époques où, pour l'hémisphère considéré, le solstice d'été passe à l'aphélie ($\Pi = 90^{\circ}$ dans l'H.N., $\Pi = 270^{\circ}$ dans l'H.S.). L'existence d'une grande glaciation dans un hémisphère et d'une petite glaciation dans l'autre augmente le gradient thermique méridien,

accélère les circulations atmosphérique et océanique et refroidit les océans tropicaux qui évaporent moins. Les continents connaissent des états d'aridification.

Les climats d'insolation thermique et pluviométrique des latitudes, dus aux effets conjugués des cycles de Π et de ϵ, subissent en plus le rythme lent des fluctuations de l'excentricité dont la période est d'environ 100 000 ans.

L'exposé qui précède montre le rôle important que joue le cycle précessionnel dans l'évolution paléoclimatique des latitudes intertropicales. L'inscription de ce cycle dans des dépôts géologiques prouve qu'il régissait avec netteté l'évolution paléoclimatique à l'époque où de tels dépôts se sont formés et qu'en conséquence, il y a de fortes présomptions en faveur de la position intertropicale de la région en cause à l'époque de ces dépôts.

Nous allons réanalyser la structure de diverses formations géologiques à cycle de 21 000 ans et montrer que ces formations trouvent leur interprétation naturelle dans la théorie astronomique des phases paléoclimatiques en zone tropicale.

2. *Le Dévonien supérieur et le Carbonifère inférieur de Thuringe.*

Les faits observés par KORN [26] dans les formations du Dévonien supérieur et du Carbonifère inférieur de Thuringe en moyenne Allemagne, permettent de dégager des conclusions très significatives. Ces formations sont constituées de varves déposées dans des estuaires marins. Les couches étudiées comportent une assez grande variété de varves.

Dans le Dévonien supérieur, existent des varves normales à double feuillets composés respectivement d'argile et de craie fine. Mais on y trouve également des varves à quatre feuillets faits respectivement de sable fin, d'argile, de craie et d'argile, ainsi que des varves à trois feuillets composés de sable fin, de limon et d'argile.

Les couches du Carbonifère inférieur sont aussi constituées de varves à deux, trois ou quatre feuillets : limon – argile, sable – limon – argile, limon – argile – limon plus fin – argile ou aussi sable – argile – limon – argile. La varve la plus normale de ces couches est quadrifeuilletée : double alternance de dépôts grossiers et fins avec toutes les combinaisons entre grès, sable, limon et argile.

L'étude de la lithogénèse de ces varves autorise KORN à tirer la conclusion suivante dont nous soulignons l'exceptionnelle importance : au Carbonifère inférieur, l'Europe moyenne devait jouir d'un régime pluviométrique doublement périodique avec deux saisons des pluies. Les microphotographies des varves permettent même de préciser comme suit les caractéristiques du régime pluviométrique : deux maxima assez rapprochés et séparés par une saison sèche secondaire, le premier maximum étant plus marqué et une saison sèche principale suivant le second maximum. La discussion de ces faits amène KORN à admettre que les dépôts de varves quadrifeuilletés n'ont pu se produire qu'en climat équatorial, entre 10° nord et 10° sud. Les faits paléobotaniques plaident d'ailleurs pour cette conclusion. Mais elle entraîne des conséquences d'une telle portée qu'il importe de la discuter attentivement.

On pourrait d'abord objecter qu'il existe à l'époque actuelle des régions non tropicales dont le régime pluviométrique manifeste deux saisons de pluies distinctes. C'est le cas par exemple de Salt Lake City (Utah, 41° N) et de Marseille (43° N) qui reçoivent des pluies plus abondantes en mars-avril et en octobre-novembre.

Or, le véritable critère du caractère intertropical d'un régime pluviométrique, c'est la concomitance entre les hautes températures et les maxima saisonniers des pluies. Ce critère atteste la genèse des précipitations par convection thermique, donc l'appartenance du lieu à la zone intertropicale. Dans le cas des varves étudiées par KORN et déposées en estuaire marin, les faits observés ne permettent pas d'appliquer ce critère. Un fait qui prend pour nous rang d'argument décisif nous est cependant offert par la présence de couches à varves bifeuilletées et de couches à varves quadrifeuilletées dans les dépôts du Dévonien supérieur et du Carbonifère inférieur de Thuringe. Nous voyons en effet dans cette variation le reflet du balayage d'une région équatoriale ou subéquatoriale par l'équateur calorifique, au cours du balancement cyclique de ce dernier autour de l'équateur géographique. Considérons par exemple une région à 8° de latitude Sud et supposons que l'excentricité soit égale à 0,05. A l'époque où Π vaut 90°, l'équateur calorifique occupe la latitude de 8° Nord et la région subit un displuvial avec l'alternance : saison sèche intense – forte saison des pluies. Dix

mille ans plus tard, lorsque Π atteint 270°, l'équateur calorifique passe à la latitude de la région et celle-ci jouit d'un isopluvial avec rythme quadrisaisonnier à deux saisons de fortes pluies d'équinoxes et deux saisons de faibles pluies de solstices.

Par ailleurs, KORN a observé dans des coupes du Carbonifère inférieur la réalisation de cycles au sein de couches alternantes ayant 30 à 100 m de puissance. Ces couches sont d'âge viséen et l'on peut donc estimer l'époque de leur formation à environ 320 millions d'années d'après la nouvelle échelle des temps géologiques établie par FAUL en 1960 [14]. Chaque cycle commence par une base faite de grès grossier et se transforme graduellement en schistes argileux fins. Des cycles plus petits portant sur des dépôts de 2 à 25 m d'épaisseur peuvent être décelés au sein du cycle principal. Trois séries de mesures effectuées dans ces coupes ont fourni les durées suivantes pour la période du cycle majeur : 19 500, 23 000 et 18 500 ans. KORN voit dans le cycle de la précession la cause possible de ces résultats. Notre interprétation ci-dessus touchant les alternances observées de couches à varves bifeuilletées et quadrifeuilletées renforce la validité de cette identification.

Nous devons donc conclure que la Thuringe occupait une latitude équatoriale ou subéquatoriale, il y a environ 320 millions d'années, âge approximatif des dépôts étudiés par KORN.

3. *L'Eocène moyen du Bassin de la « Green River » au Colorado.*

BRADLEY [5] a étudié avec précision la chronologie et la structure des couches à varves qui constituent le Bassin de la « Green River » dans les territoires conjoints du Wyoming, de l'Utah et du Colorado, entre 40 et 43° de latitude nord. Ces dépôts couvrent une superficie d'environ 65 000 km² sur une épaisseur moyenne de 600 m. Les varves qui composent ces sédiments ont été déposées au fond de l'ancien lac Gosiute. Celui-ci recouvrait la région à l'Eocène moyen, il y a environ 50 millions d'années d'après l'échelle géochronologique de HOLMES [21]. Des couches alternantes de schistes bitumineux (*oilshale*) et de roches marneuses (*marlstone*) attestent que le rythme climatique annuel qui déterminait la sédimentation des varves évoluait selon un cycle paléoclimatique régulier, la période d'un cycle complet étant égale au nombre total de varves contenues dans un système

de deux couches consécutives. BRADLEY a mesuré quatre groupes de ces couches alternantes, dans le Comté de Garfield au Colorado. Au total, seize systèmes ont été étudiés chronologiquement. La période moyenne du dépôt d'un système est de 21 630 ans, avec une variation de 16 100 à 27 000 ans.

En moyenne, les couches de schistes contiennent 9 260 varves, tandis que les couches marneuses en rassemblent 12 370. Il en résulte que les premières se forment en une période plus courte de 3 110 ans en moyenne que la période des secondes. La structure normale d'une varve de ces couches lacustres comporte deux feuillets. L'un de ces feuillets est riche en sables, en argiles, ainsi qu'en carbonates de calcium et de magnésium. L'autre feuillet plus mince est nettement enrichi en matières organiques. L'épaisseur moyenne des varves dans les couches marneuses est 0,167 mm contre 0,037 mm pour les varves des couches de schistes les plus riches en bitume. Les varves du premier type manifestent une séparation plus nette entre les feuillets composants que celles du second type. Les épaisseurs moyennes des seize couches observées sont respectivement 1,94 m pour les marnes et 0,53 m pour les schistes. BRADLEY reconnaît dans la période de 21 630 ans celle du cycle précessionnel et il explique l'alternance des couches de schistes et de marnes dans le cadre de la théorie astronomique. Nous reprendrons succinctement son explication en nous référant pour la clarté au cycle de l'angle Π.

Lorsque Π vaut 90°, le périhélie correspond au solstice d'hiver. Les latitudes nord jouissent d'un hiver adouci par la distance minimale de la Terre au Soleil et raccourci par l'accélération du mouvement de la Terre au périhélie. L'été de ces latitudes qui se produit alors à l'aphélie, est aussi adouci mais allongé. Lorsque Π vaut 270°, le périhélie correspond cette fois au solstice d'été. L'été des latitudes nord est plus chaud et plus court. Leur hiver est plus froid et plus long. Il en résulte qu'au cours d'une demi-période de 10 500 ans en moyenne, où Π variait entre 0 et 180°, le lac Gosiute jouissait d'un rythme saisonnier adouci, avec été allongé et hiver court, tandis que dans l'intervalle complémentaire, où Π oscillait de 180° à 360°, le lac connaissait des contrastes saisonniers extrêmes : été chauds et courts, hivers froids et longs. Les climats des périodes 0 — 180° et 180° — 360° étaient d'autant mieux différenciés que l'excentricité était plus

forte. BRADLEY considère que la moitié du cycle $180^o < \Pi < 360^o$ aux étés courts et chauds, pourrait correspondre au dépôt de couches relativement minces de schistes riches en huiles. Au contraire, l'autre moitié du cycle $0 < \Pi < 180^o$ aux étés tempérés et allongés, aurait favorisé la sédimentation des couches plus épaisses de marnes organiques. Dans son interprétation, BRADLEY met ainsi l'accent sur le régime thermique du lac et sur les variations de ce régime au cours d'un cycle Π pour expliquer le dépôt des varves et la formation des couches alternantes de ces varves. Il admet que le paléoclimat moyen du lac Gosiute était caractérisé par des hivers frais et humides et par des étés chauds, la température annuelle moyenne étant d'environ 18,5° C. Le régime pluviométrique devait jouir d'une cote udométrique comprise entre 765 et 1 100 m. Touchant les variations saisonnières des pluies, BRADLEY [5, p. 94 et 101] se réfère à des opinions de C. E. P. BROOKS et estime que le régime pluviométrique du lac pouvait manifester des pluies légères au cours d'un hiver doux et une saison sèche se produisant durant un été chaud. Ces caractéristiques, notons-le, sont celles du régime pluviométrique méditerranéen à pluies cycloniques d'hiver. Discutant la formation, sous un tel climat, des varves à feuillets contrastés, BRADLEY remarque que les hautes températures d'été précipitaient les carbonates principalement au début de l'été, alors que la formation de plancton atteignait son maximum au milieu ou à la fin de l'été. La chute plus rapide des carbonates plus denses différenciait les deux feuillets des varves.

Les interprétations précédentes nous ont paru offrir diverses difficultés dues au type climatique admis pour la réalisation des varves et des alternances de leurs couches. Un type particulier de varves à feuillet minéral fort épaissi par des dépôts détritiques de sable fin, de limon et de calcaire forme dans les dépôts de la Green River Epoch, une troisième variété de couches faites de fin grès calcaire. La structure de ces varves manifeste une décroissance dans la dimension des grains, de la base au sommet du feuillet minéral. L'enrichissement en matières organiques devient alors progressif et engendre le second feuillet. Toutefois, la transition entre le sommet de ce dernier et la base grossière de la varve suivante s'effectue brusquement. Ce type de varve nous a suggéré que les fortes pluies qui amenaient les

matériaux détritiques au lac devaient se produire au cours de l'été, en concomitance avec la précipitation des carbonates. A la fin des pluies estivales, le plancton se développait et trouvait durant toute la saison sèche d'hiver ses conditions de production optimale jusqu'au retour de la nouvelle saison des pluies. Cette interprétation fait appel à un régime pluviométrique à pluies de convection d'été, régime qui caractérise essentiellement les régions tropicales ou subtropicales. Nous sommes ainsi amené à expliquer les dépôts du lac Gosiute dans le cadre de notre théorie astronomique des phases pluviales et interpluviales, applicable dans toute la zone de basses latitudes à pluies de convection thermique.

Un premier argument en faveur de notre thèse réside dans le fait qu'elle lève une difficulté soulignée par BRADLEY touchant la transition brusque entre les couches de schistes et de marnes. Ces discontinuités ne peuvent s'expliquer si l'on fait appel au rythme thermique saisonnier et à ses modifications au cours du cycle Π pour justifier les alternances de couches. Dans une telle interprétation, les changements climatiques réalisant le passage d'une situation extrême à l'autre doivent s'effectuer avec continuité. Celle-ci découle du rôle de variable essentiellement continue que joue la température dans toute évolution paléoclimatique à longue ou à courte durée. Au contraire, l'élément précipitations joue en climatologie le rôle d'une variable discontinue par les contrastes entre absence ou présence des pluies, celles-ci pouvant être nulles au cours d'une saison sèche d'hiver ou pouvant reprendre assez brusquement et avec une intensité variée pendant la saison estivale à haute insolation.

Dans le cadre de notre interprétation, l'alternance des couches de roches marneuses et de schistes bitumineux s'explique comme suit. Au cours de la demi-période 180°, 270°, 360° de Π, les latitudes tropicales nord du lac connaissent un displuvial, de fortes averses orageuses d'été se produisant au cours d'une courte saison chaude qui succède à une sécheresse d'hiver, sévère, allongée et nettement plus froide. Ce displuvial confère au régime pluviométrique une allure de type tropical. Au cours de cette période, à haute pluviosité estivale, le lac est en crue. Il atteint un niveau élevé et sa profondeur augmente. Durant l'été, les abondants matériaux détritiques amenés au lac par ses tributaires gonflés

se déposent au fond du lac, en s'étageant selon la grosseur des grains et en se mélangeant aux carbonates précipités. Les couches marneuses correspondent à ce type de saison paléoclimatique. Durant la demi-période suivante où Π varie entre 0, 90° et 180°, le lac subit un régime pluviométrique appauvri en pluies estivales, le déficit d'insolation d'été ralentissant la formation des pluies de convection. Le lac est en voie d'assèchement. Les contrastes saisonniers sont adoucis en pluies et en température. Ces conditions climatiques correspondent à la formation des couches à schistes bitumineux. Nous arrivons ainsi à une conclusion inverse de celle admise par BRADLEY pour la concordance entre les couches et les demi-intervalles du cycle Π qui en sont les causes. Les caractéristiques d'épaisseur et de composition, offertes par les couches alternantes de marnes et de schistes, semblent en bon accord avec notre interprétation. Il en est de même de la structure des varves. La transition brusque entre le sommet d'un feuillet organique et la base du feuillet minéral trouve son explication naturelle dans le contraste entre la fin de la sécheresse et les premières averses de la saison chaude. Il reste à expliquer la rapidité de l'évolution des varves dans les minces dépôts transitoires qui séparent deux couches successives de marnes et de schistes bitumineux. Cette variation aiguë reflète simplement la rapidité du passage d'un type de régime pluviométrique à un autre au cours du balayage des latitudes par les zones climatiques, sans cesse déplacées autour de l'équateur selon le balancement de l'équateur calorifique régi par le cycle Π. Remarquons par exemple qu'actuellement et en Afrique tropicale septentrionale, les isohyètes annuelles varient selon un gradient méridien très marqué de 750 mm à 100 mm entre 14° et 20° Nord. Lorsque l'excentricité e reste élevée, soit à 0,05, l'équateur calorifique et les systèmes climatiques balancent de 0° à $+ 8°$, de $+ 8°$ à 0°, de 0° à $- 8°$ et de $- 8°$ à 0° en un cycle complet de 21 000 ans. Dans un balayage des latitudes par les zones climatiques effectué à une telle vitesse, le passage d'un type climatique à un autre peut parfaitement se produire en moins de 1 000 ans, soit en moins du dixième de l'épaisseur d'une couche. La période de dépôt d'une couche est mesurée par l'intervalle de temps compris entre deux passages de l'équateur calorifique à une latitude-seuil où s'installent

les conditions climatiques propices au type de dépôt envisagé. La différence moyenne de 3 000 ans entre la durée raccourcie d'une couche de schistes bitumineux et celle allongée d'une couche de marne, signifie que le régime climatique favorable au dépôt des varves schisteuses perdurait tant que l'équateur calorifique occupait dans l'hémisphère nord une latitude supérieure à une latitude-seuil donnée. En admettant par exemple une excentricité $e = 0{,}05$, on calcule facilement que cette latitude-seuil est égale à $+ 2°3$.

La vraisemblance de notre thèse est renforcée par l'analyse des conditions qui favorisaient optimalement la production de cycles pluviométriques *successifs*, à période déterminée par Π. Les variations séculaires de l'insolation journalière J aux solstices et aux équinoxes se traduisent en fonction des variations séculaires des éléments e, Π et ϵ par les relations que nous avons établies [3],

$$\begin{cases} \text{Équinoxe de printemps :} & \Delta J_p = C_p\, \Delta(e \cos \Pi). \\ \text{Solstice d'été :} & \Delta J_e = P_e\, \Delta(e \sin \Pi) + E_e\, \Delta\epsilon \\ \text{Équinoxe d'automne :} & \Delta J_a = C_a\, \Delta(e \cos \Pi) \\ \text{Solstice d'hiver :} & \Delta J_h = P_h\, \Delta(e \sin \Pi) + E_h\, \Delta\epsilon \end{cases} \tag{2}$$

Dans ces équations, les variations séculaires d'une variable x sont rapportées à l'époque actuelle où la variable prend la valeur x_o de sorte que $\Delta x = x - x_o$. Les coefficients C, P, E ont des valeurs numériques variables avec la latitude, que nous avons calculées [3, Tableau III]. En adoptant les valeurs actuelles (1950), $e_o = 0{,}0167$, $\Pi_o = 102°05'$ et $\epsilon_o = 23°27'$, on obtient :

$$\begin{cases} \Delta(e \cos \Pi) = e \cos \Pi + 0{,}0035 \\ \Delta(e \sin \Pi) = e \sin \Pi - 0{,}0163 \\ \Delta\epsilon = \epsilon - 23°27' \end{cases} \tag{3}$$

Ces formules montrent que le cycle Π conditionne l'évolution du régime d'insolation d'une manière d'autant plus déterminante que l'excentricité est plus forte et que les oscillations de l'obliquité sont plus faibles autour de la valeur actuelle. D'autre part, $\sin \Pi$ prenant ses valeurs extrêmes $- 1$ et $+ 1$ pour $\Pi = 270°$ et $90°$, l'amplitude totale de variation de $\Delta(e \sin \Pi)$ au cours d'un cycle complet de Π est $2e$. L'amplitude totale des

oscillations de ϵ reste de 2° en moyenne. Le rapport des amplitudes des termes en Π et en ϵ dans ΔJ_e est donc $P_e e/E_e$. Le tableau suivant donne la variation de ce rapport pour les latitudes de 0° à + 90° et pour diverses valeurs de e.

Tableau I. — Valeurs absolues du rapport $\frac{P_e}{E_e}$ e.

Lat.	Excentricité e = ...						
	...0,00	...0,01	...0,02	...0,03	...0,04	...0,05	...0,06
+ 90°	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,4	2,9
+ 80°	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
+ 70°	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
+ 60°	0,0	0,7	1,5	2,2	2,9	3,6	4,4
+ 50°	0,0	1,0	2,1	3,1	4,2	5,2	6,2
+ 40°	0,0	1,5	3,1	4,6	6,1	7,7	9,2
+ 30°	0,0	2,6	5,2	7,8	10,4	13,0	15,6
+ 20°	0,0	7,1	14,2	21,3	28,4	35,6	42,7
+ 10°	0,0	9,3	18,6	27,9	37,2	46,5	55,8
+ 0°	0,0	2,7	5,3	8,0	10,7	13,4	16,0

Ces résultats permettent d'énoncer les conclusions suivantes.

1° Le cycle de l'élément Π devient d'autant plus prépondérant sur le cycle de l'élément ϵ et régit d'autant plus nettement l'évolution paléoclimatique, que la latitude est plus voisine d'environ 10° et que l'excentricité est plus forte.

2° La zone $(+\varphi, -\varphi)$ où le cycle Π reste prépondérant $(P_e e/E_e > 5)$ s'élargit avec l'augmentation de l'excentricité et peut même atteindre les latitudes de $\pm$ 50° lorsque e approche 0,05. La simple existence de quelques unités cycliques à 21 000 ans dans des dépôts géologiques ne peut donc constituer une preuve formelle de la position intertropicale de ces dépôts à l'époque de leur formation. Toutefois, la réalisation de séquences cycliques de plus de 4 à 5 unités apporte une bonne présomption en faveur d'une telle position car l'excentricité reprend généralement de faibles valeurs environ tous les 95 000 ans [3, fig. 6]. A cet égard, remarquons que BRADLEY a observé une série de 6 cycles consécutifs de Π couvrant une durée totale de 127 300 ans. Il arrive d'ailleurs que l'excentricité reste supérieure à sa valeur actuelle durant des périodes de l'ordre de 300 000 ans. Si l'évolution de e au cours de l'histoire géologique a gardé l'allure de ses

fluctuations séculaires quaternaires, il est impossible qu'une longue séquence paléoclimatique rythmée par le cycle de 21 000 ans se réalise en gardant un caractère cyclique de netteté invariable. Les coupes géologiques ne peuvent donc mettre clairement en évidence le cycle de 21 000 ans que sur des ensembles de couches portant sur quelques unités cycliques seulement. L'application de ces conclusions reste toutefois restreinte aux aires continentales car, comme EMILIANI le souligne [12], le cycle de l'obliquité de période 41 000 ans qui détermine l'évolution paléoclimatique des hautes latitudes peut influencer la température de l'océan et les conditions de la sédimentation marine, même aux basses latitudes, par le jeu des courants océaniques.

La succession régulière de couches géologiques alternantes offrant le cycle de 21 000 ans exige encore la réalisation d'autres conditions. Au cours d'une ère glaciaire provoquée par une phase d'orogénèse active qui relève l'attitude moyenne des continents [3], les variations séculaires de l'obliquité à 41 000 ans de période provoquent, en association avec celles de Π, des alternances de glaciation et d'interglaciation. Dans la théorie astronomique des climats quaternaires, le système $\Pi = 90°$, ϵ minimum engendre le développement maximum d'une calotte glaciaire sur les hautes latitudes nord tandis que le système opposé $\Pi = 270°$, ϵ maximum y réalise un grand interglaciaire. Toutefois, tant qu'un certain seuil d'orogénèse, de relief et d'altitude des continents n'est pas atteint, l'ère glaciaire ne peut se déclancher. Les effets combinés de ϵ et de Π sur l'insolation n'entraînent pas les alternances de glaciation et d'interglaciation. Les fluctuations de ϵ notamment ne peuvent alors provoquer qu'une modulation secondaire des climats polaires et du climat des océans. La zone tropicale où le cycle Π se manifeste à l'état pur s'élargit donc d'autant plus que la pénéplanation des continents est plus avancée et que les fluctuations de ϵ sont plus faibles. L'Eocène moyen où les dépôts de la Green River se sont produits en inscrivant le cycle de 21 000 ans fut justement une dernière époque de calme orogénique ayant précédé la grande orogénèse alpine. Au cours de cette époque, l'économie thermique du globe restait bonne et les transgressions océaniques étaient importantes.

Un troisième argument en faveur de notre interprétation des dépôts de la Green River est fourni par leur flore fossile.

Cette flore a été revue par KNOWLTON [24] et a été complétée par BROWN [8]. Elle contient des genres aussi caractéristiques de climats tropicaux que *Danaea, Acrostichum, Lygodium, Flabellaria* et *Brasenia*. BROWN y signale la prépondérance de mésophytes subtropicaux et la présence de nombreux genres qui requièrent l'existence d'un climat chaud, aux pluies abondantes. Citons par exemple parmi les plus caractéristiques de ces genres : *Chrysobalanus, Maytenus, Grewiopsis, Sterculia* et *Ternstroemites*.

Le Professeur J. LEBRUN, consulté par nous sur le sens mésologique des genres fossiles étudiés, y voit une flore typique de transition entre un climat tropical à pluies de convection thermique et un climat méditerranéen à pluies d'hiver.

L'appartenance du paléoclimat en cause à la zone des pluies de convection thermique est encore confirmée par l'opinion d'ANTEVS [1] sur les climats cénozoïques du Nevada (Great Basin). Cet auteur considère que durant l'Eocène, le climat était chaud et humide jusque dans la région du Yellowstone, tandis qu'il devenait semi-aride dans le S. W. du Wyoming. Il signale aussi qu'à cette époque, une végétation de forêts tropicales, comparable à celle actuelle du Guatemala-Venezuela recouvrait l'Oregon et les régions voisines et que cette végétation suggère la réalisation de pluies abondantes.

4. *Le Crétacé du Colorado (Bassin de l'Arkansas).*

GILBERT [16] croît pouvoir attribuer au cycle de 21 000 ans, des alternances de couches — calcaires – schistes calcaires — observées dans les roches sédimentaires marines du Bassin de l'Arkansas au Colorado. Ce rythme sédimentaire apparaît dans les coupes à quatre niveaux différents, chaque fois que ces roches prennent un faciès calcaire plus net. Ces niveaux s'étagent, de la base au sommet du Groupe Neobrara appartenant au Crétacé supérieur et dont l'âge peut se situer entre 115 et 70 millions d'années si l'on se réfère à l'échelle des temps géologiques de HOLMES [21]. La séparation entre les couches alternantes est parfois très brusque. Au niveau le plus ancien, le nombre d'alternances est d'environ quinze ; il est plus faible au quatrième niveau. L'épaisseur d'une unité cyclique sédimentaire est à peu près de 45 cm pour les couches du premier et

du second niveau. Elle atteint environ 82 cm pour les unités du troisième niveau. L'alternance est réalisée dans ce cas par la teneur en calcaire des schistes et elle se produit une dizaine de fois.

5. *Le Jurassique-Crétacé des Alpes Juliennes.*

WINKLER [43] attribue également au cycle de 21 000 ans le rythme observé dans les sédiments marins d'âge Jurassique-Crétacé du Bassin de l'Isonzo vers 46° N. Ces formations offrent quatre types de faciès : marneux, flysch véritable, calcaire à chert en plaquettes et un faciès particulier de calcaire. Les dépôts à flysch manifestent une alternance de couches : grès — marnes d'épaisseur moyenne respective de 11 et 5 cm. La séparation entre les couches consécutives est aiguë. Les formations qui jouissent du troisième type de faciès sont d'âge Jurassique-Crétacé et datent donc d'environ 135 millions d'années [21]. WINKLER y a observé des cycles à structure variée faite de deux, trois ou quatre couches et fournissant les rythmes *ab, ab...* ; *abc, abc...* ; *abcd, abcd...*

III. LES PALÉOCLIMATS A CYCLE SOLAIRE DE 11 ANS.

Il est remarquable que la plupart des formations géologiques ayant inscrit le cycle de la précession de 21 000 ans, établissent aussi l'existence d'un cycle de 11 ans que l'on peut identifier sans conteste au cycle des taches solaires. La durée moyenne du cycle solaire est à l'époque actuelle de 11,13 ans. La question de savoir si le cycle solaire influence ou non l'évolution des phénomènes météorologiques reste encore très controversée et la vaste bibliographie qui existe sur le problème confronte les opinions les plus contradictoires. L'inscription nette du cycle solaire dans certaines formations géologiques d'âge très varié ne peut laisser place au doute. Un coup d'œil sur les photographies des coupes réalisées dans diverses formations géologiques à varves (cf. par exemple KORN [26, Taf. VIII]) suffit à emporter la conviction des plus sceptiques. Les couches du Dévonien supérieur et du Carbonifère inférieur de Thuringe attestent nettement l'existence du cycle, qu'il s'agisse des couches à varves

bi ou quadri-feuilletées. Des 7 000 mesures effectuées, KORN fixe la durée moyenne du cycle à 11,42 ans, avec une amplitude extrême de variation entre 8 et 17 ans. Le même auteur a étudié aussi des calcaires varvés du système de Nama dans les montagnes « Naukluft » du Sud-Ouest africain [27]. Ces sédiments appartiennent vraisemblablement au Précambrien terminal. La mesure de 125 varves consécutives met en évidence l'existence de 11 cycles, le nombre de varves par cycle variant entre 8 et 15 tandis qu'un cycle moyen contient 11,4 varves. Le cycle solaire a encore été bien observé dans le Permien du Texas par UDDEN, [38]. Les dépôts éocènes du Lac Gosiute que nous avons discutés plus haut, manifestent aussi l'existence du cycle de 11 ans [5, p. 104]. RICHTER-BERNBURG [35] a reconnu nettement le cycle solaire dans les dépôts marins du Zechstein allemand au Brunswick, soit à la latitude d'environ 52°N. Ces dépôts d'âge permien supérieur (Thuringien) sont constitués de varves salines dont 40 000 ont été dénombrées par l'auteur. Une série de 5 019 varves a fourni un cycle de 11,7 ans en moyenne. D'autres cycles de $n \times 11$ ans et de $n \times 95$ ans semblent aussi se manifester. KORN [26, p. 124] signale d'ailleurs avoir observé le cycle solaire de 11 ans dans ces mêmes dépôts ainsi qu'un cycle très net de 11,5 ans dans les sédiments argileux d'âge oligocène de Linz. BROOKS [7] note que T. W. E. DAVID a reconnu le cycle solaire dans les varves glaciaires du Carbonifère supérieur de l'Australie.

Cette dernière observation prouve que le cycle de 11 ans peut être enregistré aussi bien sous des climats chauds que sous des climats froids. Cependant, si le cycle solaire offre ainsi un caractère ubiquiste, il reste de bonnes raisons de croire que les régions tropicales jouissent de conditions climatiques, favorables à l'enregistrement plus net du cycle dans leurs formations géologiques. Ces climats sont en effet étroitement régis dans leurs régimes thermiques et pluviométriques par le rythme saisonnier de l'insolation, sans que la régularité mathématique des variations astronomiques de cet élément soit fortement perturbée comme aux hautes latitudes par les phénomènes météorologiques du front polaire dont l'évolution est si fluctuante. Il semble possible que la constante solaire puisse subir une fluctuation de 1 à 2% en fonction du cycle des taches solaires. Cette fluctuation serait principalement due à celle de l'ultraviolet solaire, plus intense

aux époques de maximum de taches solaires et affaibli aux époques de minimum d'activité. Les observations ionosphériques établissent la réalité de ces variations cycliques de l'UV solaire mais la concordance de celles-ci avec les fluctuations possibles de la constante solaire n'est pas encore bien établie.

Il convient de mettre ici bien en évidence la haute sensibilité de la température terrestre à d'éventuelles fluctuations de la constante solaire régie par le cycle des taches. Dans une étude en préparation [4], nous avons obtenu pour l'expression du rayonnement thermique planétaire N* d'une latitude, en fonction de la nébulosité n et de la température absolue T_s au niveau du substrat terrestre,

$$N^*(\text{cal/cm}^2\ \text{min}) = 0{,}503(1 - n)\sigma T_s^4 + 0{,}188n + 0{,}0877 \quad (4)$$

Cette expression semi-empirique fournit des valeurs de N* pour les latitudes de 0, 10°, 20° ... 90° N qui sont en accord à moins de 2% près avec les valeurs déterminées par HOUGHTON [22]. D'autre part, l'équation du bilan énergétique d'une latitude s'écrit,

$$N^* = (1 - a^*)I + Q_d \quad (5)$$

a^* étant l'albédo planétaire de la latitude, I son insolation et Q_d la chaleur d'advection méridienne. En tenant compte de (4) et en différentiant (5), on trouve que l'effet thermique propre $(dT_s)_I$ provoqué sur la température T_s par une variation dI de l'insolation, s'exprime par l'équation

$$(dT_s)_I = \frac{1 - a^*}{0{,}503\,(1 - n)\,4\sigma T_s^3}\,dI \quad (6)$$

Les calculs numériques montrent alors que des fluctuations de dI s'élevant à $\pm$ 1 % exercent des effets thermiques propres qui s'avèrent être notables aux diverses latitudes durant l'été et seulement aux latitudes tropicales durant l'hiver (cf. *Tableau II*). L'insolation étant proportionnelle à la constante solaire, les variations de celle-ci en fonction du rythme des taches pourraient ainsi provoquer des effets thermiques aux répercussions climatiques appréciables.

Tableau II. — Effets thermiques propres en °C d'une variation de la constante solaire de + 1%

Lat.	Été	Hiver	Année
90° N	1,87	0,00	0,94
80°	2,31	0,06	1,19
60°	2,25	0,63	1,44
40°	1,92	1,22	1,57
20°	1,91	1,41	1,66
0°	1,92	1,97	1,94

Ces résultats montrent que le cycle solaire serait susceptible d'influencer la circulation générale de l'atmosphère en modifiant le gradient thermique équateur-pôle. Aux époques où dI est positif, le gradient reste quasiment inchangé durant l'été. Les températures plus hautes provoquent une fonte estivale accrue des glaciers aux latitudes élevées. Le gradient d'hiver est au contraire plus fort et la circulation de l'atmosphère est plus active ; les pluies d'hiver augmentent aux hautes latitudes. En régions tropicales, les pluies de convection thermique sont plus abondantes. Des conclusions inverses s'appliquent aux époques où dI est négatif, le gradient estival restant toutefois peu modifié.

Nous avons déjà insisté sur la sensibilité remarquable que les régimes pluviométriques de la zone tropicale, à pluies de convection thermique, manifestent à l'égard de faibles variations du régime de l'insolation [3]. Des effets thermiques propres de l'insolation, comme ceux calculés au *Tableau II* et dus au cycle des taches solaires, pourraient donc avoir influencé suffisamment les régimes pluviométriques et thermiques des régions tropicales au cours de l'histoire géologique pour marquer leur empreinte dans la stratigraphie. C'est pourquoi nous considérons que l'association des cycles de 11 et de 21 000 ans dans un paléoclimat, renforce la présomption en faveur du caractère tropical de ce paléoclimat.

IV. Les causes des variations de latitude.

Il importe de souligner que certains changements paléoclimatiques, commentés ci-dessus, résultent d'une véritable variation des latitudes au sens astronomique du terme. Si cette con-

clusion reste discutable dans le cas des formations de la « Green River », elle peut être affirmée avec bien plus de certitude pour les dépôts étudiés par KORN. Les faits observés y attestent :

1° Le double balancement annuel du Soleil en hauteur qui caractérise les latitudes tropicales ;

2° Le double balancement de l'équateur calorifique autour de l'équateur géographique en un cycle précessionnel de 21 000 ans.

De tels faits ne peuvent s'interpréter dans le cadre de théories paléoclimatiques qui ne feraient pas appel à une variation progressive en latitude de la Thuringe, d'une latitude intertropicale à sa latitude actuelle de 50°N. Dès lors, le problème de rechercher la cause de telles variations de latitude ne peut recevoir que deux solutions qui ne s'excluent d'ailleurs pas mutuellement. On peut considérer d'abord que les continents occupent à la surface du Globe des positions relatives qui restent plus ou moins fixes mais que les pôles subissent une importante migration à travers la surface terrestre, en entraînant avec eux leur réseau de parallèles et de méridiens. Une seconde solution consiste à admettre que les pôles restent fixés à l'ellipsoïde terrestre supposé indéformable mais que les continents subissent une dérive à la surface du Globe, en flottant sur le sima plus visqueux, la dérive modifiant à la fois la position en latitude et en longitude des lieux continentaux. Dans la première manière de voir, c'est le réseau des parallèles et des méridiens qui glisse sur la surface des continents aux positions relatives fixées. Dans la seconde, ce sont les continents qui glissent à la surface du réseau fixe des parallèles et des méridiens. Une troisième attitude intermédiaire accepte à la fois la migration des pôles et la dérive des continents. Les variations des coordonnées géographiques résultent alors de la composition des deux déplacements. Chacun de ces points de vue rencontre ses partisans et ses adversaires. Nous avons cherché à nous faire une opinion objective sur le degré de validité de ces diverses solutions. A cette fin, le délicat problème de la migration des pôles retiendra d'abord notre attention.

Cette question est complexe et une bonne compréhension de sa solution exige que les notions de base soient clairement précisées. La figure de la Terre est celle d'un ellipsoïde de révolution aplati tournant autour d'un axe appelé axe instantané de rotation. Les points de percée de cet axe avec l'ellipsoïde et la sphère

céleste définissent respectivement les pôles terrestres et les pôles célestes instantanés. La latitude d'un point du Globe est déterminée par rapport au pôle céleste de l'hémisphère considéré. Les climats d'insolation des latitudes terrestres se distribuent selon une symétrie zonale autour des pôles et de l'axe de rotation instantanés. L'inclinaison de cet axe sur le plan de l'écliptique peut subir des variations mais celles-ci ne peuvent altérer la symétrie zonale des climats autour de l'axe. Les variations de l'obliquité ϵ modifient seulement les contrastes offerts en moyenne annuelle par les climats d'insolation des latitudes selon un gradient méridien ainsi que les contrastes saisonniers d'insolation propres aux diverses latitudes. Comme tout solide quelconque, l'ellipsoïde terrestre a trois axes principaux d'inertie, perpendiculaires deux à deux. La symétrie de rotation de l'ellipsoïde place deux de ces axes Ox et Oy dans le plan équatorial circulaire, leur position restant indéfinie. Les moments d'inertie A et B sont égaux. Le troisième axe Oz, perpendiculaire au plan équatorial, reste constamment très voisin de l'axe de rotation Oz' et n'est pas nécessairement confondu avec ce dernier. Cet axe d'inertie jouit du moment d'inertie maximum $C = \Sigma mr^2$, la somme s'étendant à toutes les masses ponctuelles m de l'ellipsoïde et r étant la distance du point à l'axe. Un autre axe pouvant encore être considéré est l'axe de symétrie ou de figure de l'ellipsoïde de référence, solide mathématique dont la surface se confond le mieux avec celle de l'ellipsoïde terrestre. Les phénomènes géophysiques et géologiques provoquent des déplacements de masse à l'intérieur et à la surface du Globe. Ces mouvements modifient évidemment la position de l'axe de plus grand moment d'inertie à l'intérieur de l'ellipsoïde mais ils ne peuvent modifier appréciablement la position du centre de gravité terrestre O. Il en résulte que les axes de rotation et d'inertie Oz' et Oz forment entre eux un angle θ. La mécanique démontre que cet angle reste nécessairement très faible. Toutefois, la Terre étant déformable, certains admettent que les axes liés de rotation et d'inertie peuvent subir des déplacements considérables par les effets cumulés des mouvements de masses superficielles et internes, au cours de l'histoire géologique. Envisagés dans un système d'axes fixés au plan de l'écliptique, ces déplacements apparaissent comme formés d'un déplacement relatif de l'axe de rotation dans l'ellip-

soïde et d'un déplacement absolu de l'axe de rotation dans l'espace. Le déplacement relatif consiste en un mouvement de bascule de l'ellipsoïde autour de l'axe de rotation, avec réajustement continuel de forme, en vue de maintenir la figure d'équilibre à symétrie axiale de l'ellipsoïde. Dans ce mouvement, les pôles migrent à travers la configuration des continents et des océans, en entraînant avec eux le réseau des latitudes et des méridiens qui leur sont liés. Si l'on admet que les continents peuvent en outre dériver à la surface de l'ellipsoïde, la variation des coordonnées géographiques et des climats sera la résultante de la migration des pôles et de la dérive.

V. Le problème de la migration des pôles.

1. *État de la question.*

Le problème des variations de latitude étant ainsi précisé dans son cadre qualitatif général et sous ses divers aspects relatifs, nous pouvons aborder la théorie du déplacement des pôles. Nous l'introduirons par l'étude de la nutation eulérienne. Considérons d'abord l'ellipsoïde terrestre comme un corps solide tournant autour d'un point fixe qui est le centre de gravité, le trièdre de référence étant formé par les trois axes principaux d'inertie du solide. L'intégration des équations d'Euler qui régissent le mouvement montre que si l'axe de rotation instantané Oz' du Globe forme à un instant donné un certain angle θ avec l'axe de plus grande inertie Oz, l'axe principal décrira autour de l'axe Oz' un cône circulaire d'ouverture 2θ, la période τ_o du mouvement étant donnée par l'équation

$$\tau_o = \frac{2\pi}{\omega} \frac{A}{C-A} \tag{7}$$

et le sens de balayage de ce cône étant celui de la rotation terrestre. Dans cette relation, ω est la vitesse angulaire de la rotation terrestre que l'intégration des équations prouve être une quantité constante. Les quantités A et C sont respectivement les moments principaux d'inertie de l'ellipsoïde terrestre par rapport à un axe quelconque du grand cercle équatorial et par rapport à l'axe Oz.

La théorie du mouvement de précession de l'axe terrestre

détermine avec précision le rapport $A/C - A$. Sous l'effet du renflement équatorial de la Terre, les forces de gravitation dues aux masses lunaire et solaire provoquent dans le plan de l'écliptique une lente rotation rétrograde de l'intersection de ce plan avec l'équateur terrestre. Cette précession luni-solaire des équinoxes s'effectue à la vitesse de 50″37 d'arc par an. Au cours de ce mouvement, l'axe terrestre décrit une surface conique d'ouverture 2ϵ en 25 730 ans. L'expression de la précession luni-solaire, analysée en fonction de ses causes, contient le rapport $r_1 = (C - A)/C$ appelé constante de précession ou aplatissement mécanique du Globe. Les observations astronomiques lui assignent la valeur précise de 1/305,8. Le rapport $r_2 = (C - A)/A$ dont l'inverse intervient dans la relation (7) vaut $r_1/1 - r_1$ soit 1/304,8. Si l'on choisit le jour comme unité de temps dans (7), on doit poser $\omega = 2\pi$. On trouve ainsi 305 jours pour la période de la nutation eulérienne.

L'étude de la courbe (polhodie) décrite par le pôle autour d'une position moyenne de référence montre qu'actuellement, le mouvement réel du pôle résulte de la superposition de deux mouvements : un mouvement circulaire de période moyenne égale à 440 jours (période de CHANDLER) et un mouvement elliptique de période annuelle. La divergence entre la période de la première composante et la période eulérienne s'explique par le fait que la Terre n'est pas un solide parfait. La théorie de la rotation d'un corps déformable retrouve bien la période de CHANDLER, à condition d'admettre que la rigidité moyenne de la Terre vaut $\mu = 1{,}53 \times 10^{12}$ dynes/cm^2, soit le double de la rigidité de l'acier. Le mouvement circulaire est une oscillation libre dont l'amplitude est très faible, puisque l'angle entre le pôle d'inertie et le pôle de rotation reste de l'ordre de 0,2″. La cause qui entretient cette oscillation libre reste inconnue. On a aussi établi que si l'excitation de l'oscillation cessait, l'amplitude s'amortirait rapidement, le temps de relaxation pour lequel l'amplitude est réduite à $1/e$ de sa valeur initiale étant de 15 ans environ. La cause de cet amortissement est à chercher dans les propriétés d'élastico-viscosité du Globe. Elle est encore mal élucidée [23]. Le mouvement elliptique traduit une oscillation forcée, due aux redistributions de masses atmosphériques, océaniques et neigeuses au cours du cycle annuel des phénomènes météorologiques.

C'est la considération de cette oscillation forcée qui introduit sous la forme suivante la question de la migration des pôles au cours de l'histoire géologique du Globe : les redistributions incessantes de masses dans la croûte terrestre qui caractérisent les grands cycles géologiques, les mouvements internes de matière au sein du Globe, ne peuvent-ils engendrer par accumulation d'effets une divagation des pôles à la surface de la Terre selon une trajectoire offrant d'importantes variations en latitude ?

Les géologues et les paléontologues ont souvent fait appel au déplacement commode des pôles pour expliquer les faits étranges de la paléoclimatologie. Les astronomes et les géophysiciens aboutissent à des conclusions plus nuancées sur la possibilité de grandes migrations des pôles. Les avis à cet égard sont d'ailleurs fort partagés.

Sir G. H. DARWIN, en 1877 a étudié le problème d'une manière très approfondie sous l'angle mathématique malgré la grande imperfection des connaissances géophysiques de l'époque. DARWIN [10'] aboutit d'abord à la conclusion déjà énoncée plus haut que l'axe de rotation instantané du Globe et son axe principal d'inertie doivent être restés en quasi-coïncidence au cours de toute l'histoire géologique. Il étudie ensuite la mobilité du pôle de rotation ainsi lié au pôle d'inertie, pour un Globe supposé visqueux et capable de réajuster sa figure d'équilibre d'une manière continue autour du pôle de rotation déplacé par le jeu de forces internes. Ses résultats lui permettent de calculer l'angle de déplacement du pôle d'inertie pour une série d'aires de soulèvement continental qui représentent des fractions données de la surface terrestre et pour un soulèvement final de 3 000 m. Il conclut que les déplacements possibles du pôle en latitude au cours de l'histoire géologique restent de l'ordre de 1 à 3°.

Le problème du déplacement des pôles sous l'effet des actions géologiques a été discuté à l'aide de raisonnements quantitatifs simples par SCHIAPARELLI en 1889 [36]. Cet astronome a montré que si le Globe est supposé doué d'une rigidité absolue, les pôles ne peuvent subir que des variations d'une fraction de degré sous l'effet des actions géologiques les plus considérables. Dans le cas opposé, où le Globe serait susceptible d'une réadaptation immédiate de forme, les actions géologiques normales pourraient largement suffire à faire accomplir aux pôles de grandes migra-

tions irrégulières. Dans le cas du Globe réel, qui ne peut être considéré comme parfaitement rigide ou fluide, l'adaptation de forme est retardée. SCHIAPARELLI introduit une quantité k appelée constante d'adaptation qui mesure la distance limite de l'écartement possible entre le pôle de rotation P et le pôle d'équilibre P_1. Les pôles restent fixes si la rigidité du Globe suffit à maintenir la condition $k > 2PP_1$ au cours de l'évolution géologique. Dans le cas inverse, de grandes migrations polaires peuvent se produire.

MILANKOVITCH [32] a exposé une théorie mathématique du déplacement des pôles basée essentiellement sur l'hypothèse que le Globe est une masse fluide déformable. Le mécanisme du déplacement des pôles est alors le suivant. Supposons qu'il existe, au moment initial, un déséquilibre dans la distribution des masses au sein d'une couche superficielle où jouent les lois isostatiques. Ce déséquilibre écarte légèrement le pôle d'inertie du pôle de rotation. Étant considéré comme fluide pour les tensions et les temps en jeu, l'ellipsoïde réajuste sa figure d'équilibre autour de l'axe de rotation. Ce réajustement entraîne une nouvelle anomalie isostatique, laquelle provoque un nouveau déplacement du pôle d'inertie et un nouveau réajustement de l'ellipsoïde. Ce processus engendre ainsi une succession de causes et d'effets dont l'interaction au cours de l'évolution géologique peut faire décrire au pôle une trajectoire importante à travers la configuration des continents et des océans. En schématisant la distribution actuelle de ceux-ci et en calculant les charges isostatiques correspondantes, la théorie conduit MILANKOVITCH a préciser la trajectoire suivie par le pôle nord dans une échelle de temps relative. Dans cette trajectoire, le pôle remonte à peu près le méridien de -150^o de longitude en plein Pacifique, depuis la latitude de $+20^o$ à l'époque $-\infty$ jusqu'à la latitude $+90^o$ à l'époque actuelle. La trajectoire opposée du pôle sud s'est effectuée le long du 30e méridien entre les latitudes de -20^o et de -90^o. Ces trajectoires théoriques offrent une étonnante similitude avec celles admises par divers auteurs pour expliquer l'évolution paléoclimatique des continents depuis l'époque carbonifère (KREICHGAUER [28] ; KÖPPEN et WEGENER [25]).

UMBGROVE [39] a souligné l'aspect fallacieux de cette concordance, mis en évidence par H. KUIPER [29] dans une thèse où sont repris sous l'angle critique les calculs de MILANKOVITCH.

Ce dernier n'obtient en effet cette concordance qu'au prix d'une hypothèse isostatique fort improbable puisqu'elle consiste à admettre que la couche sialitique sous les océans est plus épaisse que sous les continents. Avec l'hypothèse isostatique normale, la trajectoire du pôle se poursuivrait d'après KUIPER dans une direction opposée à celle obtenue par MILANKOVITCH.

BROUWER [6] considère que l'évidence astronomique s'oppose fortement à la réalisation de déplacements de l'axe de rotation plus grands que 2° en un milliard d'années.

GOLD [19] rediscute le problème de l'instabilité de l'axe de rotation de la Terre en mettant l'accent sur les propriétés de plasticité qui permettraient au Globe de subir les réajustements concomitants au déplacement du pôle et de maintenir le processus de *feed-back* exposé plus haut. Il considère que les pôles peuvent avoir migré selon une succession de mouvements accélérés et ralentis.

GOGUEL [18] examine la question du déplacement séculaire du pôle sous les hypothèses successives où le Globe est supposé rigide et sphérique, rigide et aplati, puis réel c'est-à-dire aplati et déformable. Si dans le premier cas des déplacements rapides du pôle peuvent se produire, ces déplacements s'annulent dans le second cas. Pour le globe réel, la vitesse du déplacement dépend de la viscosité d'ensemble de la Terre. GOGUEL conclut que les mouvements de circulation en surface comme les courants marins ou les vents cycloniques pourraient déplacer le pôle d'un quart de méridien en 400 millions d'années.

Sir H. JEFFREYS [23] consacre un paragraphe au problème dans la 4e édition de son magistral ouvrage « The Earth ». Il fait succinctement le point de la question sans conclure et il en souligne divers aspects qui soulèvent des difficultés à résoudre.

2. *Stabilisation des pôles par les réajustements isostatiques des masses déplacées dans l'évolution géologique.*

De cette revue d'ensemble du problème, se dégage d'abord la conclusion que la démonstration géophysique décisive, touchant la possibilité ou non des grandes migrations polaires, fait toujours défaut, principalement par manque de données précises quant aux propriétés physiques des matériaux constitutifs du Globe.

Les arguments apportés par les auteurs restent de ce fait trop qualitatifs et les théories mathématiques élaborées reposent sur des bases physiques encore fragiles. L'étude du problème nous a amené à formuler les quelques réflexions ci-après, qui convergent vers l'improbabilité de déplacements polaires appréciables, depuis le début des temps géologiques.

Admettons par exemple que l'axe de rotation du pôle ait pu subir un déplacement important en latitude à travers la configuration de la surface terrestre. Supposons-le égal à 90° pour des raisons de simplification et de clarté des raisonnements. L'axe de rotation et l'axe de plus grande inertie restent nécessairement très voisins et l'axe de rotation garde une direction fixe dans l'espace au cours de ce déplacement. Si nous portons notre attention sur l'état initial et final de ce déplacement, le résultat acquis revient à faire basculer l'ellipsoïde terrestre de 90° autour de l'axe fixe de rotation puis à le réajuster en une fois à sa forme d'équilibre : un ellipsoïde de révolution aplati le long de l'axe. Admettons qu'au cours du réajustement permanent à la forme d'équilibre, l'ellipsoïde terrestre maintienne son aplatissement constant. Cette hypothèse semble admise implicitement par les partisans des grands déplacements polaires. Elle n'est cependant légitime que si la vitesse de la rotation terrestre reste elle-même constante au cours du temps. Dans l'opération du déplacement global d'un quart de méridien, le grand cercle équatorial primitif devient une ellipse méridienne, tandis que l'ellipse méridienne primitive réajuste sa forme à celle circulaire du nouvel équateur terrestre. L'effet global d'un déplacement polaire de 90° s'avère ainsi considérable, au point de vue des masses déplacées, des moments d'inertie modifiés et des variations d'altitude ou de position horizontale subies par les continents. Les moments principaux d'inertie A et C s'étant substitués l'un à l'autre dans ce déplacement, la variation totale de moment dans un tel réajustement est de $C - A = 2{,}6.10^{42}\,g\,cm^2$. Les variations du moment d'inertie dues aux événements géologiques les plus considérables que l'on puisse concevoir, restent d'un ordre de grandeur bien inférieur à C — A. Calculons par exemple le moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation du Continent africain situé au-dessus de la surface océanique. Ce moment est environ $I = MR^2$, M étant la masse du Continent et R le rayon terrestre,

puisque le centre de gravité est voisin de l'équateur. La masse M vaut ρHS, si ρ mesure la densité, H l'altitude moyenne et S la superficie du Continent. En adoptant $\rho = 2{,}78$ g/cm^3, $S = 3.10^{17}$ cm^2, $H = 0{,}75.10^5$cm, $R = 6{,}37.10^8$ cm, on trouve $M = 6{,}26.10^{22}$ g et $I = 2{,}54.10^{40}$ g cm^2. C'est la centième partie de C—A. Or, au cours de l'évolution géologique, des redistributions incessantes de masse se produisent à la surface du Globe sous l'effet de phénomènes divers comme l'orogénèse et les séismes, le volcanisme, la sédimentation et l'érosion, la genèse de calottes glaciaires au détriment des eaux océaniques ou leur fusion.

Ces redistributions de masse posent le problème de leurs effets sur le déplacement de l'axe d'inertie *Oz* par rapport à l'axe de rotation *Oz'*. TISSERAND [37, II, p. 482] fournit l'expression de l'angle $d\theta$ formé entre ces deux axes, quand une masse ponctuelle $d\mu$ est, soit ajoutée ou enlevée au point de coordonnées (R, φ, λ) à la surface du Globe, soit déplacée en verticale, soit déplacée en latitude φ et en longitude λ. La démonstration suppose que l'angle $d\theta$ reste suffisamment petit pour pouvoir négliger les termes en $d\theta^2$. Les expressions données par TISSERAND ne tiennent pas compte du réajustement isostatique. Nous allons montrer que ce réajustement atténue les déplacements calculés d'un facteur de l'ordre du millième.

Rapportons l'ellipsoïde terrestre à des axes *Ox*, *Oy*, *Oz* passant par le centre de gravité *O*, les axes de rotation et d'inertie étant supposés confondus initialement avec *Oz*, de sorte que ces axes sont les axes principaux d'inertie. La théorie montre que toute modification ou tout déplacement de masse à la surface du Globe disjoint les deux axes confondus *Oz* et *Oz'* d'un angle (*zOz'*), désigné par $d\theta$ et donné par l'expression,

$$d\theta = \frac{\sqrt{D^2 + E^2}}{C - A} \tag{8}$$

Dans cette formule, les quantités A et C sont les moments d'inertie relatifs aux axes *Ox* et *Oz*,

$$A = \Sigma m(y^2 + z^2) \qquad C = \Sigma m(x^2 + y^2), \tag{9}$$

tandis que les quantités D et E expriment les produits d'inertie

$$D = \Sigma myz \qquad E = \Sigma mzx \tag{10}$$

Ces dernières quantités valaient zéro avant la variation ou le déplacement de masse puisque les axes *Ox*, *Oy*, *Oz* sont les axes principaux d'inertie. Elles prennent les valeurs non nulles (10) après la modification de masse.

Si l'on change d'une quantité $d\mu$ en un point de coordonnées (R, φ, λ) la masse de la croûte terrestre, on trouve aisément que l'angle $d\theta_1$ et la longitude L du pôle d'inertie déplacé sont donnés par les relations,

$$d\theta_1 = \frac{1}{2(c-a)} \frac{d\mu}{M_T} \sin 2\varphi \begin{cases} d\mu > 0, \ L = 180^o + \lambda \\ d\mu < 0, \ L = \lambda \end{cases} \tag{11}$$

en posant,

$$c - a = \frac{C - A}{M_T R^2} \tag{12}$$

M_T étant la masse de la Terre et R son rayon moyen. Les relations (11) établissent que l'augmentation ou la soustraction d'une masse $d\mu$ au lieu (R, φ, λ) repousse le pôle d'inertie sur le prolongement du méridien du lieu ou le rapproche sur ce méridien d'un angle proportionnel à $d\mu$ et à sin 2φ.

Lorsque la masse $d\mu$ subit un exhaussement ou un enfoncement vertical dR, on montre de même que le déplacement du pôle d'inertie se définit par les équations,

$$d\theta_2 = \frac{1}{c-a} \frac{d\mu}{M_T} \frac{dR}{R} \sin 2\varphi \begin{cases} dR > 0, \ L = 180^o + \lambda \\ dR < 0, \ L = \lambda \end{cases} \tag{13}$$

Dans la réalité géologique, l'enlèvement de masse par érosion ou l'addition de charge par sédimentation se combinent avec des mouvements verticaux dans la colonne terrestre qui, allégée ou surchargée, subit le réajustement isostatique. Nous nous sommes ainsi posé la question de déterminer l'angle $d\theta$ sous les conditions imposées par le principe de l'isostasie. Nous adopterons l'hypothèse isostatique selon AIRY qui est bien admise par la géophysique moderne. Aux termes de cette hypothèse, on peut considérer la croûte terrestre comme constituée d'un faisceau de prismes verticaux de sial plus léger qui flottent en équilibre hydrostatique sur le sima sousjacent plus lourd. Il existe ainsi à partir d'une certaine distance R_c du centre terrestre une surface de niveau dite de compensation pour laquelle il se maintient une bonne égalité entre les masses des

divers prismes de même section qui surmontent cette surface.

Soit un de ces prismes de section carrée a^2 formé d'une épaisseur AB = h de croûte sialitique, l'axe de ce parallélipipède étant un rayon terrestre de latitude φ que nous situons dans le plan xz (*Figure 1*). Il est facile d'établir d'abord le lemme suivant : le produit d'inertie Σmxz d'un parallélipipède homogène situé au-dessus de la surface R_c et dont l'axe est un rayon terrestre s'exprime, à des termes du second ordre près, comme si toute la masse était concentrée en son centre de gravité. Ce résultat étant acquis, l'expression de l'angle $d\theta$ dû à une modification $d\mu$ de masse à la latitude φ et compte tenu du réajustement isostatique peut être obtenue par le raisonnement ci-après.

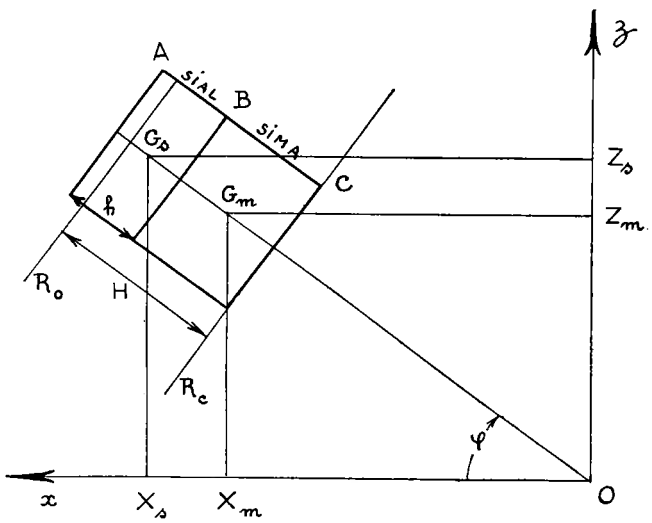

FIG. 1. — Parallélipipèdes AB de sial et BC de sima composant la colonne AC en équilibre isostatique au-dessus de la surface de compensation R_o.

Considérons la colonne parallélipipédique AC de croûte terrestre de section carrée a^2 reposant en équilibre isostatique sur la surface de compensation désignée par sa distance R_c au centre O de la Terre. Cette colonne est formée des parallélipipèdes AB de sial et BC de sima ; elle contient une masse totale de matière M, invariable au cours des réajustements isostatiques.

Désignons par ρ_s et ρ_m les densités respectives du sial et du sima et introduisons la hauteur H définie par $M = \rho_m H$. La surface de niveau $R_o = R_c + H$ est celle pour laquelle on peut

enlever toute la croûte de sial qui la surmonte sans changer la masse M, à condition de remplacer par du sima les racines sialitiques comprises entre les surfaces R_c et R_o.

Soient m_s et m_m les masses de sial et de sima des parallélipipèdes AB et BC. Le principe de l'isostasie donne,

$$M = \rho_m H = m_s + m_m = \rho_s h + \rho_m BC. \qquad (14)$$

En posant $\rho_s/\rho_m = k$, cette relation fournit pour la hauteur du prisme de sima,

$$BC = H - kh \qquad (15)$$

L'application du lemme précité aux parallélipipèdes AB et AC qui composent la colonne AC permet d'exprimer le produit d'inertie de celle-ci comme suit,

$$E = \Sigma mxz = m_s X_s Z_s + m_m X_m Z_m \qquad (16a)$$

en désignant par X_s, Z_s et par X_m, Z_m les coordonnées respectives des centres de gravité G_s et G_m. Or, si l'on pose $OG_m = R_m$ et $OG_s = R_s$, il vient :

$$\begin{cases} X_s = R_s \cos\varphi \\ Z_s = R_s \sin\varphi \end{cases} \qquad \begin{cases} X_m = R_m \cos\varphi \\ Z_m = R_m \sin\varphi \end{cases}$$

En outre, les masses des parallélipipèdes AB et BC ont pour expression :

$$m_s = \rho_s a^2 h, \quad m_m = \rho_m a^2 (H - kh) = a^2(\rho_m H - \rho_s h).$$

Par ces relations, l'équation (16a) devient :

$$E = \frac{a^2}{2} \sin 2\varphi \, [\rho_s h \, R_s^2 + (\rho_m H - \rho_s h) R_m^2]. \qquad (16b)$$

Introduisons le rayon terrestre de référence défini par $R_o = R_c + H$ en remarquant que les rayons R_s et R_m valent respectivement :

$$R_s = R_o - \left(k - \frac{1}{2}\right) h, \qquad R_m = R_o - \frac{H}{2} - \frac{k}{2} h. \qquad (17)$$

Remplaçons R_s et R_m par leur expression (17) dans (16b). En rangeant les termes selon les puissances croissantes de h, le développement donne, après la mise en évidence de $\rho_m H R_o^2$,

$$E = \frac{a^2}{2} \sin 2\varphi \, \rho_m H R_o^2 \left\{ \left(1 - \frac{H}{R_o} + \frac{H^2}{4R_o^2} \right) + \frac{kH}{4R_o^2} h + \left[\frac{k(1-k)}{HR_o} - \frac{k^2}{4R_o^2} \right] h^2 + \frac{3k^3 - 4k^2 + k}{4HR_o^2} h^3 \right\} \quad (18)$$

Telle est l'expression du produit d'inertie d'une colonne de croûte terrestre reposant en équilibre isostatique sur la surface de compensation et formée d'une colonne de sial de hauteur h quelconque. Dans l'évolution géologique, des masses de sial peuvent s'ajouter par sédimentation à la colonne h ou lui être soustraites par érosion. La nouvelle hauteur de la colonne de sial devient $h + dh$, mais en même temps le réajustement isostatique surélève la colonne de sial si elle est allégée par érosion (dh négatif). Il l'enfonce au contraire si la colonne est surchargée par sédimentation (dh positif). La variation dE du produit d'inertie correspondant à la variation dh et compte tenu du réajustement s'obtient en différentiant (18) par rapport à h :

$$dE = \frac{a^2}{2} \sin 2\varphi \, \rho_m H R_o^2 \, dh \left\{ \frac{kH}{4R_o^2} + \left[\frac{2k(1-k)}{H} - \frac{k^2}{2R_o} \right] \frac{h}{R_o} + \frac{3}{4} \frac{3k^3 - 4k^2 + k}{H} \frac{h^2}{R_o^2} \right\}. \quad (19)$$

Dans cette expression, on peut poser $k = 0{,}816$, $H \simeq 100$ km, $R_o \simeq 6\,370$ km et $h \simeq 30$ km. Il en résulte que le terme en $2k(1-k)\,H$ est largement principal. D'où la relation valable avec une bonne approximation,

$$dE = (1-k)\, d\mu \, h \, R. \sin 2\varphi. \quad (20)$$

en remarquant que la modification géologique de masse est $d\mu = \rho_s a^2 dh$.

Le choix des axes annulant $D = \Sigma myz$ dans l'équation (8), on obtient finalement pour l'expression de l'angle $d\theta$ en tenant compte de (12),

$$d\theta = \frac{dE}{C - A} = \frac{1-k}{c-a} \frac{h}{R_o} \frac{d\mu}{M_T} \sin 2\varphi. \quad (21)$$

En comparant ce résultat avec (11), on voit que le réajustement isostatique introduit le facteur sans dimension $2(1-k)\, h/R_o$

dans l'expression de l'angle $d\theta$. En adoptant $\rho_s = 2{,}67$, $\rho_m = 3{,}27$, $1 - k = 0{,}184$, $R_o = 6371$ km, on trouve que ce facteur vaut $0{,}58\ 10^{-4}\ h$ (km). La hauteur h de la croûte sialitique est de l'ordre de 30 km pour les continents. Le facteur du réajustement isostatique vaut donc environ $1{,}74\ 10^{-3}$. Il amortit considérablement la disjonction du pôle de rotation et du pôle d'inertie. On pourrait encore préciser le résultat théorique (21) en remarquant que, pour les profondeurs en cause, les densités augmentent avec le rapprochement du centre de la Terre. Toutefois, on peut considérer dès à présent que l'équation (21) fixe l'ordre de grandeur de l'effet étudié.

3. *Exemples numériques.*

Montrons par un exemple numérique que les variations de masse les plus considérables de la géologie ne peuvent ainsi entraîner que des angles $d\theta$ tout à fait insignifiants. Supposons un massif montagneux de 1 000 km × 1 000 km de superficie (10^{16} cm^2), érodé d'une couche sialitique de 1 000 m d'épaisseur et situé à la latitude $\varphi = 45^o$ qui maxime $d\theta$. Adoptons $h = 32$ km. La masse M_T valant $5{,}975\ 10^{27}$ g et le rayon moyen 6 371 km $= 6{,}371\ 10^8$ cm, on trouve $c - a = 1{,}072\ 10^{-3}$. On obtient ainsi, la masse $d\mu$ valant $2{,}67\ 10^{21}$,

$$d\theta = \frac{0{,}184}{1{,}072.10^{-3}} \times \frac{2{,}67.10^{21}}{5{,}975.10^{27}} \times \frac{1}{200} = 0{,}383.10^{-6} \text{ radians} \qquad (22)$$

ce qui correspond à $2{,}06.10^5 \times 0{,}383.10^{-6} = 0{,}08$ secondes d'arc, soit à un recul insignifiant de 2,4 m du pôle d'inertie.

Ajoutons encore que l'intégration de dE ou $d\theta$ selon les variables φ et λ pour la surface entière du Globe introduit une nouvelle compensation horizontale des masses déplacées dans les phénomènes géologiques. Ceux-ci s'effectuent avec une lenteur suffisante pour que le réajustement isostatique joue en concomitance parfaite avec leur évolution. On peut ainsi présumer que l'angle résultant θ doit être resté quasiment nul au cours de toute l'histoire géologique. Toutefois, lorsque les modifications importantes de masses se réalisent trop brusquement et empêchent la compensation isostatique de réaliser son action atténuatrice, l'angle θ peut prendre momentanément une

valeur moins négligeable. Ce cas est celui des grandes calottes glaciaires du Quaternaire dont le cycle de genèse et d'extinction s'effectue en 20 000 ans environ. Le volume des calottes glaciaires de l'hémisphère nord au cours de la dernière phase glaciaire (WÜRM III), maximum il y a 20 000 ans, est estimé à 40 millions de km³ par FLINT [15]. Le centre de masse de ces calottes glaciaires occupe environ le point $\varphi = 60^{o}$ N, $\lambda = 50^{o}$ W. Cette masse est prélevée à l'océan, principalement dans l'hémisphère sud. La distribution symétrique de la surface océanique sud autour du pôle autorise à négliger l'effet de la dépression des océans dans le calcul estimant $d\theta$. En supposant que le réajustement isostatique n'ait pas eu le temps d'intervenir, l'expression (11) s'applique et fournit comme limite supérieure de $d\theta$

$$d\theta = \frac{1}{2 \times 1{,}072.10^{-3}} \times \frac{4.10^{22}}{5{,}975.10^{27}} \times 0{,}866 = 0{,}0027 \text{ radians} \quad (23)$$

soit 556″ ou 9′16″. Dans ces conditions extrêmes, le pôle d'inertie recule de 17,2 km.

4. *Autres arguments favorables à la stabilité des pôles.*

Un autre argument contre la possibilité de déplacements importants des pôles, par le jeu du réajustement continu de l'ellipsoïde, résulte des modifications de position des divers lieux de la surface terrestre. Remarquons d'abord qu'un déplacement de 90° des pôles correspond à un affaissement de 21 km selon le rayon terrestre, puisque le rayon équatorial devient un rayon polaire. La modification de courbure provoque également des variations selon les positions φ et λ occupées. MILANKOVITCH [32, p. 227] a d'ailleurs fourni les expressions de ces variations. Si θ est la variation angulaire du pôle, un point de latitude φ subit des réajustements respectifs d'altitude ΔR et de distance latitudinale $R\Delta\varphi$ donnés par les relations suivantes où e mesure l'applatissement terrestre,

$$\begin{cases} \Delta R = +e\,\theta\,R \sin 2\varphi \\ R\Delta\varphi = -e\,\theta\,R \cos 2\varphi \end{cases} \quad (24)$$

Chaque déplacement angulaire θ d'un degré, entraîne ainsi des valeurs $\Delta R = 375 \sin 2\varphi$ mètres et $R\Delta\varphi = -375 \cos 2\varphi$ mètres.

Au cours d'une migration polaire importante, la croûte terrestre devrait donc être maintenue dans un état permanent de tensions internes considérables. Ces tensions seraient génératrices de failles et de charriages réajustant continuellement le Globe à sa figure ellipsoïdale d'équilibre autour du pôle intinérant. Ces réajustements devraient porter d'ailleurs sur la masse entière du Globe, puisque les diverses surfaces internes de niveau sont elles-mêmes des surfaces ellipsoïdales d'équilibre autour de l'axe de rotation. FISHER [13] admet qu'un déplacement de cet axe de 10 minutes d'arc suffirait à produire des forces comparables à celles mises en jeu dans la formation des chaînes de montagne. Une migration polaire de plusieurs dizaines de degrés, depuis le Carbonifère inférieur jusqu'au Quaternaire, aurait donc dû maintenir une activité tectonique de grande ampleur. En outre, le réajustement instantané de la surface des océans aurait produit des transgressions continuelles submergeant les aires continentales. Ces vues semblent inconciliables avec la pérennité des vieux boucliers continentaux, fixés dans leurs traits géologiques essentiels depuis des temps très anciens. Elles le sont tout autant avec le caractère cyclique des grandes pulsations orogéniques. On sait en effet que deux cycles successifs de telles pulsations ménagent entre eux une longue période de calme orogénique relatif. Or la dernière de ces périodes se situe entre les orogénèses hercynienne et alpine, soit dans l'intervalle de — 270 millions à — 70 millions d'années compris entre le Permo-Carbonifère et le début de l'Éocène. Ce fait est ainsi en opposition avec la migration importante des pôles admise par certains pour expliquer les grandes altérations des paléoclimats au cours de cet intervalle couvrant 200 millions d'années.

Divers traits généraux de la structure interne du Globe rendent aussi plus vraisemblable l'hypothèse selon laquelle la forme ellipsoïdale actuelle a été acquise à une époque très ancienne où la planète encore fluide achevait sa formation. Les matières internes s'arrangeaient alors en surfaces de niveau de densité croissante vers le centre, selon les lois de l'équilibre hydrostatique. Ces surfaces de niveau internes sont aussi ellipsoïdales. Certaines d'entre-elles, appelées surfaces de discontinuité, caractérisent un changement brusque dans la structure chimique et physique de la matière des couches concentriques qu'elles séparent. Il est naturel de voir dans ces surfaces le résultat achevé et figé de

l'évolution prégéologique de la planète et il semble difficile d'admettre que ces surfaces ont également subi le réajustement d'équilibre depuis les temps primaires.

D'autre part, l'évolution naturelle des systèmes physiques obéit à des principes d'économie qui paraissent peu compatibles avec la solution coûteuse de la migration des pôles. En voulant expliquer celle-ci par des modifications géologiques de masses, il semble qu'on aboutisse à provoquer des effets supérieurs aux causes elles-mêmes. C'est le propre des systèmes instables. Or la figure d'ellipsoïde aplati du Globe est une figure d'équilibre stable d'une masse fluide en rotation. La stabilité des pôles est d'abord assurée par le renflement équatorial dont le rôle s'exprime par le dénominateur C-A dans l'expression (8) du déplacement polaire. Nous avons montré que le réajustement isostatique réalise un second facteur très puissant de stabilisation des pôles sollicités à se mouvoir par les perturbations géologiques des masses superficielles. C'est pourquoi nous considérons plus raisonnable, dans l'état actuel des connaissances, d'admettre que les faibles disjonctions entre les axes de rotation et d'inertie dues à ces perturbations géologiques de masses engendrent des forces internes de rappel qui provoquent des réajustements de masses et de moments d'inertie toujours dirigés vers la restauration de l'équilibre. Le problème géophysique que posent ces considérations est de déterminer si les tensions internes engendrées par les disjonctions polaires suffisent ou non à faire fléchir les forces de réaction liées aux propriétés d'élasticoviscosité des matériaux constitutifs du Globe. Ce problème, nœud essentiel de la question relative à la possibilité ou non de grands déplacements des pôles, n'a pas encore reçu de solution rationnelle satisfaisante.

VI. La dérive en latitude des continents.

Si les pôles ne peuvent subir de déplacements appréciables au cours de l'histoire géologique, la dérive des continents subsiste comme seule explication possible des variations importantes de latitude que les faits géologiques exposés plus haut constatent. Soulignons de suite que la position que nous sommes ainsi amené à prendre touchant la nécessité d'un mobilisme des continents

à composante méridienne reste distincte de l'attitude consistant à adopter complètement, dans son argumentation originale, la théorie de la Dérive des Continents d'Alfred WEGENER [41 ; 42]. La position de ce dernier quant au problème de la migration des pôles est d'ailleurs opposée à nos propres conclusions. Dans l'exposé de sa théorie [42, ch. VIII] ainsi que dans son ouvrage de paléoclimatologie élaboré avec W. KÖPPEN en 1924 [25], WEGENER explique l'évolution paléoclimatique comme un effet résultant de la migration des pôles et de la dérive des continents. Touchant le premier phénomène, il s'exprime en des termes qui ne laissent pas de surprendre et auxquels nous ne pouvons souscrire :

« Le déplacement du pôle est une notion géologique... La géophysique ne peut pas se prononcer en ce qui concerne l'existence ou la possibilité de pareils mouvements ».

Nous retiendrons seulement pour notre propos l'idée maîtresse de WEGENER : celle qui consiste à considérer les continents comme des radeaux de sial plus légers, flottant sur le sima visqueux et subissant une dérive à la surface de l'ellipsoïde. La première partie de l'idée fondamentale rappelée ci-dessus est unanimement admise, puisqu'elle n'est rien d'autre que le principe de l'isostasie appliquée aux continents entiers. Par contre, la géophysique n'a pas encore réussi à identifier la cause motrice de la dérive. Cette absence d'explication reste le principal argument des géophysiciens qui se posent en adversaires du mobilisme des continents.

L'histoire des sciences astronomiques et géophysiques ne manque pourtant pas d'exemples où un phénomène naturel, de faible intensité et à évolution très lente, a d'abord été mis en doute avant d'être confirmé comme une conséquence rationnellement déduite dans le cadre d'une théorie cohérente, expliquant des faits d'observation précis. Rejeter la possibilité d'un phénomène en invoquant une carence de causes explicatives dans l'état actuel d'une science, c'est admettre que le faisceau des causes dont devrait résulter le phénomène est définitivement et complètement formé. C'est s'opposer aussi à la démarche habituelle de l'esprit qui anime le progrès des sciences naturelles et qui consiste à remonter du fait à sa cause, en s'attachant d'abord

à l'étude minutieuse du fait. A cet égard, la faiblesse de l'hypothèse du mobilisme des continents, c'est que le phénomène de la dérive appartient au passé géologique. Sa réalité ne peut s'établir que par des voies indirectes, à partir de raisonnements ou de faits suspectés par les uns, n'éveillant aucun intérêt chez les autres au gré des appartenances scientifiques cloisonnées et diversifiées. Ainsi, certains géophysiciens sont peu sensibles au réalisme des faits paléobotaniques ou paléoclimatiques qui établissent les variations de latitude et qui posent le dilemme : migration des pôles ou dérive continentale. Si ces faits plaident en faveur de la seconde solution, les paléoécologistes sont alors en droit d'interroger les géophysiciens sur les causes du phénomène. La réponse de ceux-ci si elle revient à dire « qu'il n'y a pas de dérive puisqu'on en ignore les causes géophysiques » rend le dialogue impossible. JEFFREYS [23] s'avère être un des adversaires les plus résolus du mobilisme des continents. Mais après avoir présenté ses objections de géophysicien, il ajoute [23, p. 368] :

« It is argued that if evidence from paleontology and meteorology proves that continental drift has taken place, evidence from geophysics that it is impossible is beside the point. If I admitted the premises I might accept the conclusions, white still maintaining that it is remarkable that the advocates of continental drift have not produced in thirty years an explanation that will bear inspection ».

La force d'EÖTVÖS qui tend à déplacer vers l'équateur un corps flottant à la surface de la Terre, a souvent été invoquée pour expliquer la dérive des continents, car elle fournit une indispensable composante ouest. Cependant cette force s'avère être trop faible pour être tenue responsable de la dérive (GUTENBERG [20]). Selon JEFFREYS [23], elle ne pourrait déplacer la croûte terrestre que d'un radian en 3 milliards d'années. La théorie exacte de cette force n'est pas encore clairement établie dans ses conditions réelles d'application. Par ailleurs, faire appel à cette force pour expliquer la dérive des continents entraîne selon nous un certain illogisme. Les arguments en faveur de la dérive prouvent en effet que le centre de masse des continents occupaient au Carbonifère une position nettement australe. La force d'EÖTVÖS aurait dû finir par stabiliser ce centre de masse au voisinage de l'équateur. Or, la dérive en latitude s'est poursuivie dans l'hémisphère nord bien au-delà de la position équa-

toriale puisque le grand bloc afroasiatique occupe actuellement une position nettement septentrionale.

Ce n'est point ici notre propos de discuter ou de rechercher les indispensables forces translatrices. On ne peut prétendre que l'ensemble des forces géophysiques ait été exploré. Les courants de convection thermique au sein de la matière interne du Globe fixent de plus en plus l'attention dans l'explication de l'orogénèse et du magnétisme terrestre. Il est possible que ces courants fournissent les forces tangentielles cherchées. Il convient de signaler à cet égard les conclusions des recherches théoriques sur les rotations internes qui ont lieu au sein d'une planète manifestant comme la Terre une certaine fluidité. De ses travaux sur ce problème, DIVE [11] conclut :

« Nous sommes fondé à penser qu'il existe à l'intérieur de notre globe, des courants de Sima, dirigés vers l'Est, d'autant plus rapides qu'ils sont plus profonds ou plus proches des pôles ».

Signalons encore que la possibilité de mouvements d'ensemble de la croûte terrestre par rapport au noyau plus fluide et sous l'effet de déplacements internes de matière est évoquée avec une faveur croissante dans les travaux géophysiques modernes.

Un progrès important qui reste à accomplir serait de décider si l'ensemble des faits d'observation connus plaide en faveur d'une évolution des paléoclimats par dérive continentale ou par migration polaire. Cette distinction doit être possible car dans le second cas, la symétrie zonale des grands paléoclimats reste maintenue durant la migration polaire en glissant à la surface de la configuration relativement fixe des continents. Les faits à réordonner ainsi sont nombreux. Ils appartiennent à la géologie, à la paléontologie et au paléomagnétisme. La distribution des traces de glaciation de même âge permocarbonifère, trouvées au Sud du Brésil, en Afrique du Sud, en Indes et en Australie n'offre en aucune manière la symétrie zonale selon un parallèle. Il est impossible de justifier paléoclimatiquement une telle distribution de glaciations autrement que par l'explication de WEGENER : existence de la Pangaea au voisinage du pôle Sud, couverte d'une calotte glaciaire au Permocarbonifère et dont les morceaux disloqués au Secondaire subissent la dérive. D'autre part, nous croyons avoir établi plus haut la position subéqua-

toriale de la Thuringe (+ 10° à — 10° ?) au Carbonifère inférieur. Cette conclusion renforce beaucoup la thèse qui consiste à voir le grand cercle équatorial, déformé par la dérive, dans la ceinture des grands dépôts houillers du Carbonifère supérieur qui s'étendent de l'Amérique à la Chine.

Les progrès de recherches touchant le paléomagnétisme des roches trancheront bientôt le dilemme : migration des pôles ou dérive des continents. Dans le premier cas, en effet, les courbes de migrations déduites des faits et propres aux divers continents doivent se superposer. La non-coïncidence de ces courbes traduit nécessairement une variation de la position relative des continents. Les travaux de RUNCORN montrent qu'au Mésozoïque, l'Amérique du Nord s'est déplacée par rapport à l'Europe d'une vingtaine de degrés vers l'Ouest. La courbe de migration des pôles pour l'Australie s'éloigne fort de celles relatives à l'Amérique du Nord et à l'Europe. Les résultats montrent aussi que la partie occidentale des États-Unis et la Grande-Bretagne occupaient au Permien une position voisine de l'équateur entre 0 et 20° N. L'étude des calcaires éoliens qui caractérisent les déserts permiens de ces régions, suggère que celles-ci se situaient dans la zone des vents alizés du secteur NE et confirment leur situation intertropicale à la fin de l'Ere paléozoïque. Des précisions sur ces questions sont fournies dans les articles publiés par OPDIKE et RUNCORN en 1959 [33] et en 1960 [34] ainsi que dans l'étude parue en 1960 de COLLINSON et RUNCORN [9].

Une récente revue critique des problèmes du paléomagnétisme publiée, par COX et DOELL en 1960 [10, p. 756-763] affermit l'opinion que de nombreux faits paléomagnétiques trouvent leur explication naturelle en acceptant des déplacements continentaux qui combinent des mouvements de translation et de rotation.

VII. L'INSUFFISANCE EXPLICATIVE DES AUTRES CAUSES PALÉOCLIMATIQUES.

Pour achever l'argumentation développée dans les paragraphes précédents, il s'avère encore nécessaire de montrer que les autres causes paléoclimatiques possibles restent toutes impuissantes

à expliquer les faits géologiques à partir desquels nous avons construit notre raisonnement. Ces causes sont très nombreuses. Nous ne pourrons examiner que les plus essentielles de celles-ci et tenter d'en dégager sommairement les principaux effets. Dans ce paragraphe de conclusion, notre but est d'attirer l'attention sur la pérennité du gradient latitudinal des paléoclimats du Globe et de montrer que ce gradient ne peut varier au cours de l'évolution terrestre qu'entre certaines limites qu'il n'est pas permis au géologue de franchir.

Ce gradient résulte du climat d'insolation des latitudes et des échanges énergétiques que le rayonnement solaire provoque dans ses interactions avec l'atmosphère et la surface terrestre. Ce fait essentiel de la paléoclimatologie mérite d'être précisé mathématiquement car des considérations arbitraires touchant l'égalisation des climats à la surface du Globe sont parfois développées par les géologues. Ainsi, l'existence dans les régions arctiques et antarctique de flores fossiles n'ayant pu prospérer que sous des paléoclimats chauds ou tempérés est souvent expliquée par un réchauffement des régions polaires au cours d'époques de grande uniformisation des climats terrestres. Une telle explication est inconciliable avec les lois de la paléoclimatologie physique comme nous allons le montrer.

Des travaux de MILANKOVITCH [31 ; 32], dégageons les équations suivantes qui donnent l'insolation I_e et I_h des semestres calorifiques chaud et froid ainsi que l'insolation annuelle $\bar{I} = I_e + I_h$ et le contraste de l'insolation semestrielle $I_e - I_h$ d'une latitude nord quelconque. A un facteur $1/\sqrt{1-e^2}$ près, toujours très voisin de 1, ces quantités s'écrivent en cal/cm²,

$$\left\{\begin{aligned} I_e &= \frac{\Theta}{2\pi} I_o \left[S(\varphi,\epsilon) + \sin\epsilon \sin\varphi - \frac{4e}{\pi}\sin\Pi\cos\varphi\right] \\ I_h &= \frac{\Theta}{2\pi} I_o \left[S(\varphi,\epsilon) - \sin\epsilon \sin\varphi + \frac{4e}{\pi}\sin\Pi\cos\varphi\right] \\ I_e + I_h &= \bar{I} = \frac{\Theta}{\pi} I_o S(\varphi,\epsilon) \\ I_e - I_h &= \frac{\Theta}{\pi} I_o \left[\sin\epsilon\sin\varphi - \frac{4e}{\pi}\sin\Pi\cos\varphi\right]. \end{aligned}\right. \tag{25}$$

Dans ces relations, Θ mesure la durée de l'année, I_o traduit la

constante solaire et $S(\varphi, \epsilon)$ exprime une fonction de φ et de l'obliquité ϵ développée en série. Au pôle, cette fonction vaut $\sin \epsilon$. A l'époque actuelle où $\epsilon_0 = 23°27'$, $S(\varphi, \epsilon)$ varie entre 0,40 au pôle et 0,96 à l'équateur. Le coefficient $\Theta I_0/\pi$ prend la valeur 916,7 cal/cm² jour en adoptant $I_0 = 2$ cal/cm² min. Il en résulte que l'insolation moyenne annuelle varie actuellement de 365 cal/cm² jour au pôle à 879 cal/cm² jour à l'équateur. Le gradient méridien d'insolation est la cause principale du gradient pôle-équateur des températures estivales, hivernales et annuelles (*Tableau III*).

Tableau III. — Gradients comparés, de l'équateur au pôle nord, de l'insolation I en cal/cm² jour et de la température en °C.

Période de l'année	Semestre d'été		Semestre d'hiver		Année	
	I	T	I	T	I	T
Équateur	860	+ 25°9	899	+ 26°5	879	+ 26°2
Pôle nord	730	— 9°8	0	— 35°6	365	— 22°7
Gradient	130	+ 35°7	899	+ 62°1	514	+ 48°9

Entre l'équateur et le pôle nord, les gradients thermiques des semestres d'été et d'hiver sont respectivement à notre époque de 35°7 et de 62°1. Les gradients d'insolation responsables sont de 130 cal/cm² jour et de 899 cal/cm² jour. Les gradients de température et d'insolation sont en moyenne annuelle de 48°9 et de 514 cal/cm² jour.

Le lien rationnel de passage entre la cause première qu'est l'insolation et son effet final, la température absolue T_s à la surface du substrat continental, est fourni par l'équation ci-après qui traduit le bilan des échanges énergétiques réalisés en surface pour un intervalle saisonnier quelconque :

$$\sigma T_s^4 = \frac{1}{\epsilon} [g(1 - a_s)I - Q - Q' + Q_i - Q_L] \qquad (26)$$

Dans cette équation, ϵ mesure le pouvoir émissif effectif de la surface $\epsilon = \epsilon_s(1 - \epsilon_A)$, ϵ_s étant son pouvoir émissif et ϵ_A le pouvoir émissif de l'atmosphère ; a_s désigne l'albédo de la surface ; g exprime le facteur de transmission G/I de l'atmosphère pour le rayonnement global G incident au sol ; Q traduit les calories échangées par convection turbulente avec l'air ; Q′ mesure la chaleur transférée en profondeur dans le sol ; Q_i

désigne le flux de chaleur interne du Globe et Q_L exprime la chaleur latente consommée dans les divers changements d'état de l'eau qui se produisent en surface.

Le système des équations (25) et (26) synthétise l'ensemble de toutes les modifications possibles du climat thermique des latitudes par l'effet des diverses causes paléoclimatiques. Les fluctuations d'intensité du rayonnement solaire, soit pour des causes astrophysiques propres à l'étoile, soit pour des causes cosmiques (accrétion) modifient la constante solaire I_o dans les équations (25). Ces variations de I_o, facteur de proportionnalité, ne peuvent altérer appréciablement les gradients thermiques méridiens. Vouloir expliquer la réalisation d'un paléoclimat chaud aux hautes latitudes par le jeu de telles causes obligerait à admettre en régions tropicales des températures si élevées que toute vie y serait impossible. Les changements dans la composition de l'atmosphère en gaz absorbant l'infrarouge thermique (CO^2, H^2O) ou en impuretés (poussières volcaniques) provoquent des variations de ϵ et de g qui entraînent par la relation (26) des fluctuations de T_s. Ces changements se distribuent d'une manière uniforme dans l'atmosphère entière et ne peuvent par conséquent constituer une cause d'altération profonde des gradients thermiques méridiens. Le pouvoir émissif effectif des continents est très sensible aux variations de leur altitude moyenne. Nous avons validé à partir de ce fait la théorie orogénique des âges glaciaires [3]. D'autre part, les circulations atmosphérique et océanique sont de puissants régulateurs des gradients thermiques méridiens. Ce jeu de régulation s'exerce dans (26) par l'intermédiaire du facteur ϵ_A de ϵ et du terme Q. L'adoucissement des gradients ne peut toutefois dépasser un certain gradient d'équilibre. Ainsi, aux époques de fortes transgressions océaniques où la faible altitude moyenne des continents favorisait le mieux l'économie thermique du Globe, le gradient thermique affaibli du pôle à l'équateur diminuait l'activité des circulations atmosphérique et océanique et l'importance de leur jeu régulateur. Le flux de chaleur interne du Globe Q_i est entièrement négligeable devant les autres termes en cause dans l'équation (26) et ne peut avoir joué le moindre rôle climatique au cours de l'histoire géologique.

Il reste à examiner comment les causes astronomiques ϵ, e

et Π qui déterminent les climats d'insolation peuvent modifier les climats thermiques des latitudes. L'angle Π ne provoque que des variations cycliques de courte durée (21 000 ans) et ne joue aucun rôle déterminant dans l'évolution paléoclimatique générale. L'excentricité e n'intervient pas dans l'insolation annuelle $\bar{I}$ de latitudes. Ses variations ne peuvent donc pas influencer les gradients thermiques annuels. Examinons ensuite les influences des variations de l'obliquité ϵ dans l'évolution paléoclimatique. Les effets les plus extrêmes de ϵ pourraient avoir lieu pour les valeurs fictives $\epsilon = 0$ et $\epsilon = 54^o$.

Dans le premier cas ($\epsilon = 0$), le facteur $S(\varphi, \epsilon)$ varie de 1 à 0 de l'équateur au pôle. Le contraste méridien d'insolation équateur-pôle atteint en moyenne annuelle sa valeur maximum de 917 cal/cm² jour. Le contraste d'insolation semestrielle est alors donné par l'équation

$$I_e - I_h = -\frac{\Theta}{\pi} I_o \frac{4e}{\pi} \sin \Pi \cos \varphi \qquad (27)$$

Aux époques $\Pi = 0^o$ et 180^o, ce contraste est nul. Aux époques $\Pi = 270^o$, il vaut,

$$I_e - I_h = \frac{\Theta}{\pi} I_o \frac{4e}{\pi} \cos \varphi \qquad (28)$$

Il varie donc de 0 à $4\Theta I_o e/\pi^2$ du pôle à l'équateur. Les contrastes saisonniers restent alors pratiquement nuls pour $\epsilon = 0$. Les pôles sont très froids durant toute l'année et l'équateur très chaud.

La valeur $\epsilon = 54^o$ réalise l'égalité à $\sin 54^o = 0{,}809$ de la fonction $S(\varphi, \epsilon)$ au pôle et à l'équateur. Le gradient annuel d'insolation est alors annulé entre ces latitudes. Toutefois, il importe de remarquer que le contraste semestriel d'insolation prend la valeur,

$$I_e - I_h = \frac{\Theta}{\pi} I_o \left[0{,}81 \sin \varphi - \frac{4e}{\pi} \sin \Pi \cos \varphi\right] \qquad (29)$$

Aux hautes latitudes, le premier terme de cette relation est largement prépondérant. A 50°N par exemple, il vaudrait en moyenne par jour,

$$2 \times 917 \times 0{,}81 \times \sin 50^o = 1138 \text{ cal/cm}^2 \text{ jour} \qquad (30)$$

alors que le contraste semestriel d'insolation en moyenne journalière n'y est actuellement que de 559 cal/cm² jour.

Les hautes latitudes connaîtraient alors des étés torrides et des hivers d'une extrême rigueur. Les cercles polaires s'installeraient en outre sur les parallèles de $\pm 36^{\circ}$. Les latitudes en deça subiraient un rythme saisonnier de long jour et de longue nuit polaires. L'annulation du gradient annuel d'insolation entre les pôles et l'équateur n'est donc acceptable qu'au prix d'une contre-partie inconciliable avec l'existence d'un climat chaud à faible rythme saisonnier aux hautes latitudes. Ces résultats extrêmes restent d'application à un moindre degré lorsque ϵ est compris entre 0 et 54°. En conclusion, les flores fossiles découvertes en régions polaires et les paléoclimats qu'exige leur écologie n'ont pu exister qu'à des latitudes moyennes ou subtropicales. Ces flores apportent ainsi la preuve la plus évidente des variations de latitude.

Touchant les valeurs prises par l'obliquité au cours de l'histoire géologique, signalons que nous avons toute raison de croire que l'obliquité n'a pas dû beaucoup varier depuis la fin de l'ère primaire. La théorie de la précession luni-solaire établit, en effet, que la période de cette précession est inversément proportionnelle à cos ϵ. Or, cette période est une composante de la période de Π dont la valeur moyenne ne semble pas avoir varié appréciablement depuis l'époque carbonifère. En effet, les trois cycles précessionnels observés par KORN au Carbonifère inférieur lui assigne la valeur de 20 300 ans tandis que les seize cycles d'âge Eocène étudiés par BRADLEY conduisent à une valeur de 21 600 ans. L'étude approfondie de la variation des éléments astronomiques de l'orbite terrestre au cours de l'histoire géologique pose d'ailleurs de délicats problèmes de mécanique céleste dont l'étude sous l'angle paléoclimatique sort du cadre assigné au présent mémoire.

VIII. CONCLUSIONS.

Les réflexions et les raisonnements qui précèdent conduisent, par un faisceau d'arguments convergents, à considérer comme hautement probable la réalité d'une dérive en latitude des continents depuis la fin de l'Ère primaire. Dans l'état actuel des faits, chaque argument pris à part revêt, outre son caractère propre de vraisemblance, une nuance subjective touchant son degré de validité, variable selon l'appartenance scientifique de celui

qui l'examine. Une synthèse des faits, dans le cadre des lois rationnelles de la paléoclimatologie physique est souhaitable. On peut déjà entrevoir un stade ultérieur des connaissances où ces faits prendront leur pleine signification et où les arguments revêtiront une valeur nouvelle. Encore faudra-t-il que les faits invoqués soient de haute qualité et résultent d'un triage sévère effectué dans l'énorme ensemble des données d'observations accumulées.

Il nous paraît aussi que le réexamen du problème des cycles sédimentaires, à la lumière de la théorie astronomique des paléoclimats, pourrait être fort révélatrice. L'évidence si spectaculaire de ces cycles ou rythmes sédimentaires se retrouvent dans de nombreuses coupes géologiques naturelles à travers toute l'histoire géologique de la Terre. LOMBARD [30] a bien mis l'accent sur l'importance du phénomène de rythme dans son traité de Géologie sédimentaire (les planches 5, 10 et 11 de cet ouvrage sont particulièrement remarquables). Dans une note consacrée au « miracle » de cette sédimentation rythmique si généralisée, GIGNOUX [17] conclut que :

« ... la cause générale et profonde des rythmes sédimentaires serait à rechercher dans les oscillations climatiques périodiques, évidemment simultanées dans les climats atmosphériques et sous-marins ».

Ce serait aux astronomes, dit ensuite GIGNOUX, à nous expliquer ces variations rythmiques des climats, bien que la fameuse courbe climatique de MILANKOVITCH ne semble pas avoir trouvé créance ni auprès des astronomes ni auprès des meilleurs spécialistes du Quaternaire. Pour notre part, nos récentes études sur la théorie astronomique des paléoclimats et nos présentes conclusions nous ont fait acquérir la conviction que la solution du problème des rythmes sédimentaires réside bien dans l'étude des fluctuations des éléments de l'orbite terrestre. Il convient de remarquer à cet égard que les cinq équations (25) et (26), qui résument la théorie astronomique des paléoclimats, traduisent rationnellement des faits indiscutables : mouvements du sphéroïde terrestre autour du Soleil et conservation de l'énergie solaire incidente. La courbe de MILANKOVITCH n'exprime qu'un fait réel mais très particulier et en tout cas correct de la théorie : l'évolution séculaire de l'insolation I_φ, à la latitude de 65° N. Certaines objections faites à cette courbe ne peuvent mettre en cause

le principe même de la théorie astronomique. Le tort a été sans doute de focaliser l'attention sur une déduction particulière de la théorie, insuffisant en lui-même à expliquer l'effet climatique cherché, et de susciter ainsi la confusion entre un fait de portée limitée et l'ensemble théorique qui le contient. Le système des paléoclimats à une époque géologique quelconque ne peut être autre chose que la transformation des paléoclimats d'insolation des latitudes par les interactions de l'atmosphère et de la surface terrestre sur le rayonnement solaire. L'explication de ce système est donc inconcevable hors du cadre astronomique. Les éléments astronomiques Π et ϵ rythment nécessairement certains paléoclimats avec une netteté plus ou moins grande selon le lieu terrestre et l'époque géologique. C'est ainsi qu'au Carbonifère supérieur (Ouralien) où une calotte glaciaire se développait sur les hautes latitudes australes, l'alternance entre les maxima et les minima de l'obliquité ϵ devaient entraîner un rythme régulier de période 41 000 ans entre des états de glaciation minima et maxima. Ces alternances devaient provoquer des oscillations eustatiques du niveau de l'océan et par conséquent des cycles de régression-transgression que l'on ne peut s'empêcher d'identifier aux alternances répétées de régression-transgression attestées par les cyclothèmes des dépôts de houille.

Nous avons, d'autre part, montré par le présent mémoire l'importance déterminante des cycles astronomiques de 21 000 ans ou de 10 500 ans de période dans les rythmes paléoclimatiques respectifs des régions tropicales ou équatoriales. Si l'on songe que les faibles fluctuations énergétiques du rayonnement solaire selon le cycle de 11 ans ont pu s'inscrire dans la stratigraphie, il paraîtra évident que les fluctuations séculaires de l'insolation, cinq à dix fois plus intenses et de durée mille fois plus longue ont dû rythmer puissamment le dépôt des couches stratigraphiques et nous laisser ainsi de fréquents et spectaculaires témoignages de leur action. Une étude systématique des rythmes de la sédimentation dans les formations où des méthodes de chronologie absolue sont applicables jetterait certainement une vive lumière sur ces importantes questions.

Bruxelles, le 14 août 1961.

BIBLIOGRAPHIE

[1] ANTEVS, E. : Cenozoïc climates of the Great Basin (*Geologische Rundschau*, vol. 40, Heft 1, Zweites Klimaheft, pp. 94-108, 1952).

[2] BERNARD, E. A. :Les climats d'insolation des latitudes tropicales au Quaternaire — Théorie astronomique des pluviaux et interpluviaux africains (*Bull. de l'Acad. royale des Sciences coloniales*, V, fasc. 2, pp. 344-364, 1959).

[3] — : Théorie astronomique des pluviaux et interpluviaux du Quaternaire africain (Fluctuations séculaires du régime d'insolation des latitudes tropicales et leurs effets sur les régions thermiques et pluviométriques) (Mémoire in-8° de la Classe des Sciences nat. et méd. de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer, Vol. XII, fasc. 1, 232 p., Bruxelles, 1962).

[4] — : Lois de la climatologie physique et validité de la théorie astronomique des climats quaternaires *(En préparation, 1962)*.

[5] BRADLEY, W. H. : The varves and climate of the Green River epoch (*U. S. Geological Survey*, Professional Paper 158-E, pp. 87-110, 1929).

[6] BROUWER, D. : The polar motion and changes in the earth's orbit. Chap. 12, pp. 159-164, in SHAPLEY, H., Climatic changes, Evidence, Causes and Effects (Cambridge, 1953, 318 p.).

[7] BROOKS, C. E. P. : The problem of varves (*Quaterly Journ. R. Meteor. Soc.*, vol. 54, 1928, p. 64).

[8] BROWN, R. W. : Additions to the flora of the Green River formation (*U.S. Geological Survey*, Professional Paper 154-5, pp. 279-292, 1929).

[9] COLLINSON, D. W. and RUNCORN, S. K. : Polar wandering and continental drift : evidence from paleomagnetic observations in the United States (*Bull. of the Geol. Soc. of America*, vol. 71, n° 7, pp. 815-958, 1960).

[10] COX, A. and DOELL, R. R. : Review of paleomagnetism *(Bull. of the Geol. Soc. of America*, vol. 71, n° 6, pp. 645-768, 1960).

[10'] DARWIN, G. H. : On the influence of Geological changes on the Earth's Axis of Rotation (*Philosophical Transactions of the Royal Society*, Part. I., vol. 167, pp. 271-312, 1877). Republié dans : DARWIN, G. H. Scientific papers, vol. III, 1, pp. 1-46 (Cambridge Univ. Press., 1910).

[11] DIVE, P. : La Dérive des Continents et les mouvements intratelluriques (Paris, Dunod, 1950, 2e éd.).

[12] EMILIANI, C. : Pleistocene temperatures (*The Journal of Geology*, Vol. 63, n° 6, pp. 538-578, 1955).

[13] FISHER, J. E. : A kinematic theory of the origin forces (*Amer. Journal of Science*, vol. 243, pp. 606-613, 1945).

[14] FAUL, H. : Geological Time Scale (*Bull. of the Geol. Soc. of America*, vol. 71, n° 5, pp. 637-644, 1960).

[15] FLINT, R. F. : Glacial geology and the Pleistocene Epoch (New York, J. Wiley, 589 p., 1947).

[16] GILBERT, G. K. : Sedimentary measurement of cretaceous time (*The journal of Geology*, vol. III, n° 2, pp. 121-127, 1895).

[17] GIGNOUX, M. : Sédimentation rythmique dans les plaines maritimes et au fond des mers (*C. R. des Séances de l'Acad. des Sc.*, Tome 230, pp. 695-698, 1950).

[18] GOGUEL, J. : Les déplacements séculaires du pôle (*Annales de Geophysique*, Tome 6, fasc. 3, pp. 139-146, 1950).

[19] GOLD, T. : Instability of the earth's axis of rotation (*Nature*, vol. 175, n° 4456, pp. 526-529, 1955). Voir aussi, DAY, A. A. and RUNCORN, S. K. : Polar wandering, some geological dynamical and paleomagnetic aspects (*Nature*, vol. 176, n° 4479, pp. 422-426, 1955).

[20] GUTENBERG, B. : Forces in the earth, Ch. XIII, pp. 167-177 in GUTENBERG, B., Internal Constitution of the Earth (second ed., New York, 439, p. 1951).

[21] HOLMES, A. : A revised geological time-scale (*Transactions of the Edinburgh Geological Society*, Vol. 17, Part 3, December, pp. 183-189, 1959).

[22] HOUGHTON, H. G. : On the annual heat balance of the northern hemisphere (*Journ. of Meteor.*, vol. II, n° 1, pp. 1-9, 1954).

[23] JEFFREYS Sir H. : The earth, its origin, history and physical constitution (Cambridge Univ. Press., 4e éd. 1959).

[24] KNOWLTON, F. H. : Revision of the Flora of the Green River formation with descriptions of new species (U. S. *Geological Survey*, Professionnal Paper, 131. F, pp. 133-182, 1923).

[25] KÖPPEN, W. et WEGENER, A. : Die Klimate der geologischen Vorzeit (Berlin, 256 p., 1924).

[26] KORN, H. : Schlichtung und absolute Zeit. Bewegungen, Scheichtenaufbau und Sedimentations – geschwindigkeiten in einer varistischen Mulde nach Stüdien in thüringisch – fränkischen Unterkarbon und Oberdevon (*Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, Beilage Bände, Abt A, Bd 74, Heft 1, pp. 50-188, Stuttgart, 1938).

[27] — and MARTIN, H. : Cyclic Sedimentation in Varved Sediments of the Nama System in South-West Africa (*Trans. of the Geol. Soc. of South Africa*, vol. LIV, pp. 65-67, 1951).

[28] KREICHGAUER, D. : Die Aquatorfrage in der Geologie (Missionsdruckerei in Steyl, 394 p., 1902, 2e ed. 1926).

[29] KUIPER, H. : Poolbewegingen tengevolge van Poolvluchtkracht (Dissert. Utrecht, 1943).

[30] LOMBARD, A. : Géologie sédimentaire. Les séries marines (Paris, 722 p. 1956, cf. Troisième partie, III, les séries rythmiques, p. 447-536).

[31] MILANKOVITCH, M. : Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen, in KÖPPEN, W. und GEIGER, R. : Handbuch der Klimatologie. Bd I, Teil A, 176 p. (Berlin, 1930).

[32] — : Der Mechanismus der säkularen Polwanderungen. Kapitel XI, pp. 230-282, in : Kanon der Erdbestrahlung und seine anwendung auf das Eiszeitenproblem (Acad. Roy. Serbe, Belgrade, 633 p., 1941).

[33] OPDIKE, N. D. and RUNCORN, S. K. : Le paléomagnétisme et les directions des vents aux époques anciennes (*Endeavour*, vol. XVIII, n° 69, pp. 26-34, 1959).

[34] — and — : Wind direction in the Western United States in the late Paleozoic (*Bull. of the Geol. Soc. of America*, vol. 71, n° 7 pp. 959-972, 1960).

[35] RICHTER-BERNBURG, G. : Zeitmessung geologischer Vorgänge nach Warvenkorrelationen in Zechstein (*Geologische Rundschau*, vol. 49, 1, pp. 132-148, 1960).

[36] SCHIAPARELLI, I. V. : De la rotation de la Terre sous l'influence des actions géologiques (Mémoire présenté à l'observatoire de Poulkova à l'occasion de sa fête semi-séculaire, St. Petersbourg, 32 p. 1889).

[37] TISSERAND, F. : Traité de mécanique céleste. Tome I, Perturbations des planètes d'après la méthode de la variation des constantes arbitraires, 474 p. (Paris 1888) ; Tome II, Théorie de la figure des corps célestes et de leur mouvement de rotation, 547 p. (Paris, 1890, Nouveau tirage, Paris, 1960).

[38] UDDEN, J. A. : Laminated anhydrite in Texas (*Bull. of the Geol. Soc. of Amer.* vol. 35, pp. 347-354, 1924).

[39] UMBGROVE, J. H. F. : Recent theories on polar displacement (*American Journal of Science*, vol. 244, n° 2 pp. 105-113, 1946).

[40] van WOERKOM, A. J. J. : The astronomical theory of climatic changes, chap. 11, pp. 147-157, in SHAPLEY. H. : Climatic changes, Evidences Causes, and Effects (Cambridge, 318 p., 1953).

[41] WEGENER, A. : Die Enstehung der Kontinents und Oceane (Braunschweig, 4e éd. 1929 (1ère éd. 1915).

[42] — : La genèse des continents et des océans. Théorie des translations continentales (Trad. d'après la 5e éd. allemande par A. LERNER, Paris, 236 p., 1937).

[43] WINKLER. A. : Zum Schichtungsproblem. Ein Beitrag aus den Südalpen (*Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, Beilage Band 53, Abt. B, Heft. 3, pp. 271-314, 1926).

TABLE DES MATIÈRES

Résumé 3

Samenvatting 4

Summary 5

I. Introduction 7

II. Le caractère tropical des paléoclimats à cycle de 21 000 ans 10

1. Rappels de la théorie astronomique des pluviaux et interpluviaux 10

2. Le Dévonien supérieur et le Carbonifère inférieur de Thuringe 14

3. L'Eocène moyen du Bassin de la « Green River » au Colorado 16

4. Le Crétacé du Colorado (Bassin de l'Arkansas) 24

5. Le Jurassique-Crétacé des Alpes Juliennes 25

III. Les paléoclimats à cycle solaire de 11 ans 25

IV. Les causes des variations de latitude 28

V. Le problème de la migration des pôles 31

1. État de la question 31

2. Stabilisation des pôles par les réajustements isostatiques des masses déplacées dans l'évolution géologique 35

3. Exemples numériques 42

4. Autres arguments favorables à la stabilité des pôles 43

VI. La dérive en latitude des continents 45

VII. L'insuffisance explicative des autres causes paléoclimatiques 49

VIII. Conclusions 54

Bibliographie 57

Table des matières 60

Achevé d'imprimer le 19 février 1962
par les Editions J. Duculot, S. A., Gembloux (Belgique).