

Bull. Soc. belge Géologie	T. 87	fasc. 1	pp. 9-25	11 fig.	Bruxelles 1978
Bull. Belg. Ver. Geologie	V. 87	deel 1	blz. 9-25	11 fig.	Brussel 1978

THEORIE ASTRONOMIQUE DES PALEOCLIMATS, UNE NOUVELLE APPROCHE.

par A.L. BERGER (*)

RESUME. - Une revue critique de la théorie de Milankovitch est présentée. La difficulté d'arriver à un consensus quant à la manière dont cette théorie devrait être appliquée pour simuler les climats du passé géologique et les résultats récents qui tentent à montrer que cette théorie doit être élargie, nous ont conduit à recommander qu'aux insolutions caloriques classiques soient adjointes les variations à longues périodes de l'insolation journalière et mensuelle. L'écart de cette insolation à sa valeur actuelle a dès lors été calculée pour les latitudes de 10 en 10 degrés et pour les 12 mois de l'année. La variation de l'insolation disponible à l'équinoxe d'automne est présentée graphiquement pour le dernier million et les 100 prochains milliers d'années.

SUMMARY. - The classical theory of Milankovitch is critically reviewed. The difficulty to come to an agreement, as far as the way this theory has to be applied to simulate climatic variations, and recent results which seem to show that this theory has definitely to be enlarged, lead to recommend that long-term variations of the daily and monthly insolation be added to the classical long-term variations of the caloric insolation. The deviations of solar radiation at autumn equinox from their 1950 AD values are graphically reproduced for the previous 10^6 yr and for the next 10^5 yr.

INTRODUCTION.

Depuis un an ou deux, on assiste à un véritable regain d'intérêts pour la théorie de Milankovitch (MASON, 1976; GRIBBIN, 1976; KUKLA, 1976; GRIBBIN, 1977). Si les données géologiques ne peuvent pas encore confirmer l'entièreté de cette théorie, elles fournissent du moins un support quantitatif vital à l'existence d'une relation entre les éléments de l'orbite de la Terre et le climat et ce, à travers les variations à longues périodes de l'insolation disponible dans l'hypothèse d'une atmosphère parfaitement transparente et de sa redistribution en latitudes (voir, par exemple, le modèle de JOHNSON et McCLURE, 1976).

Parmi les résultats les plus récents, la coïncidence des quasi-périodes, découvertes à partir de l'analyse des carottes géologiques (HAYS et al., 1976) et calculées dans la théorie astronomique des

(*) Institut d'Astronomie et de Géophysique, Université Catholique de Louvain
2, Chemin du Cyclotron, 1348-Louvain-la-Neuve.

paramètres de l'orbite terrestre (BERGER, 1977a), constitue sûrement une des preuves les plus irréfutables de l'influence des paramètres orbitaux sur le climat (à moins que tous deux ne soient le résultat d'une même cause commune encore à découvrir!). Cette coïncidence répond, en fait, à la première des trois questions fondamentales qui doivent être résolues pour établir la validité globale d'une théorie astronomique des paléoclimats, à savoir :

- (1) les quasi-périodes de la théorie des variations des éléments orbitaux de la Terre sont-elles significativement présentes dans le spectre (MITCHELL, 1976) des données géologiques ?
- (2) Existe-t-il une corrélation statistiquement significative entre les courbes d'insolation et les courbes climatiques d'origine géo-écologique ? (CHAPPELL, 1973).
- (3) Ces changements d'insolation peuvent-ils provoquer des changements climatiques tels qu'observés notamment au Pléistocène ? (BERGER, 1977b).

L'objet de cet article est de proposer un nouveau type de paramètre d'insolation qui devrait être déterminant dans la recherche d'éléments de réponse aux deux dernières questions, à savoir : les variations à longues périodes des insolutions mensuelles, lien indispensable, selon l'auteur, entre la théorie astronomique et la reconstruction des variations climatiques à l'échelle du Quaternaire.

I. THEORIE DE MILANKOVITCH.

ADHEMAR (1842) et CROLL (1875) furent les premiers à tenter d'expliquer la récurrence des glaciations par la variation des éléments astronomiques de l'orbite terrestre. Mais, tandis qu'avec PILGRIM (1928), ils considéraient les hivers rigoureux comme cause fondamentale de l'accumulation des glaces, KÖPPEN (1924), SPITALER (1943) et principalement MILANKOVITCH (1920-1930 et 1941) leur préférèrent l'existence d'hivers doux et surtout d'étés frais comme facteurs primordiaux devant favoriser la glaciation.

Le rôle de Milankovitch fut, à ce point de vue, déterminant, car il établit mathématiquement l'explication du phénomène : théorie astronomique de la variation à longues périodes des éléments de l'orbite terrestre, définition du climat mathématique, étude de l'influence des conditions réelles sur ce climat théorique et application de ces résultats à l'existence des âges glaciaires par la construction de courbes d'insolation d'été à 65° Nord ou de courbes de latitudes équivalentes ϕ (*).

Cette théorie astronomique prétend que les glaciations correspondent aux périodes durant lesquelles les hautes latitudes Nord reçoivent un minimum de rayonnement solaire pendant la saison calorifique d'été, de telle sorte que, dans l'hypothèse d'une atmosphère parfaitement transparente, ce rayonnement solaire soit insuffisant pour fondre la neige accumulée en hiver.

D'autre part, la nature même du modèle implique la compensation des écarts négatifs d'été par des écarts positifs en hiver et l'existence d'une anti-symétrie entre hémisphère nord et hémisphère sud dû à l'effet opposé qu'y joue la précession. De plus, l'effet thermique dû aux seuls changements dans les paramètres orbitaux est opposé pour les latitudes situées de part et d'autre du 43ème parallèle, les variations d'insolation y étant en sens contraire, mais plus marquées, en valeur absolue, aux pôles qu'aux basses latitudes. Pendant les âges glaciaires, l'insolation aurait donc été supérieure à la normale, en hiver, principalement aux latitudes tropicales et équatoriales et

(*) C'est la latitude recevant actuellement la même quantité d'insolation que n'en recevait la latitude 65°N dans le passé géologique; on identifie en fait, les maxima de cette courbe (hautes latitudes) aux âges glaciaires.

en-dessous de la normale, en été, surtout aux latitudes polaires, marquant ainsi une intensification du gradient nord-sud.

Cette théorie de Milankovitch nécessite, par conséquent, le calcul des éléments de l'orbite de la Terre, le calcul de l'insolation disponible dans l'hypothèse d'une atmosphère parfaitement transparente et l'établissement d'un modèle climatique destiné à transformer cette insolation en température de l'air en surface. Afin de s'assurer que les deux premières étapes au moins fournissent des valeurs dont la fiabilité ne puisse plus être mise en doute (BERGER, 1975a), nous avons mis au point de nouvelles formules : (1) pour le calcul de l'insolation calorifique (BERGER, 1975b et 1978) et (2) pour la détermination d'une nouvelle solution astronomique qui comprend les termes au second ordre des masses et au troisième degré en excentricités - inclinaisons (BRETAGNON, 1974; BERGER, 1976a), et dont l'amélioration sur les solutions antérieures (BROUWER et van WOERKOM, 1950; SHARAF et BOUDNIKOVA, 1976) a été clairement mise en évidence (BERGER, 1977c).

II. PREUVES DE LA THEORIE ASTRONOMIQUE DE MILANKOVITCH.

La majeure partie de ceux qui utilisent la théorie astronomique des paléoclimats de Milankovitch pour expliquer le cycle des glaciations au Quaternaire, se basent sur le parallélisme qui semble apparaître entre les courbes des paléotempératures déterminées et datées par les géologues et celles de l'insolation d'été obtenues par MILANKOVITCH, van WOERKOM (1953), BERNARD (1962) ou plus récemment par VERNEKAR (1972) et BERGER (1978).

Le premier critère qui fut utilisé est une correspondance visuelle (BROUWER, 1950; JARDETSKY, 1961) ou statistique, plus ou moins bien marquée, entre les minima et les maxima des deux courbes. EMILIANI (1969), par l'analyse du rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans les sédiments des mers profondes, obtint l'allure générale de la variation de la température pour les 300 000 dernières années en quelques points du globe (Atlantique Nord et Equatorial, Mer des Caraïbes). Le parallélisme pour les 150 000 dernières années, entre cette courbe datée au ^{14}C et au $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ et celle des latitudes calorifiques équivalentes de van WOERKOM, ainsi qu'un excellent accord entre les dates de transgression marine maximale et de solstice d'été au périhélie, l'incitent fortement à croire à l'exactitude de la théorie de Milankovitch et à utiliser celle-ci pour établir une chronologie absolue du Quaternaire. Cette idée fut renforcée par LAMB et al. (1966) qui calculèrent, pour les 120 000 dernières années, un coefficient de corrélation avec retard de 5 000 ans égal à -0.65 (niveau de signification: 0.02), entre les latitudes équivalentes de Milankovitch et les paléotempératures d'EMILIANI, et en conclurent que la théorie astronomique pouvait au moins expliquer le dernier âge glaciaire et le réchauffement (LAMB, 1970) qui suivit.

Le coefficient de corrélation instantanée obtenu par ÖPIK (1967) est toutefois nettement moins significatif (-0.394). D'ailleurs, l'analyse de ces mêmes courbes par BROECKER (1966 et 1968a) amena d'abord ce dernier à proposer une nouvelle courbe d'insolation sur la base d'une pondération originale de la précession, de l'obliquité et de l'excentricité et ce, afin d'y faire clairement apparaître un minimum marqué à 18 000 BP et deux maxima nouveaux respectivement à 80 000 et 120 000 BP. Finalement, BROECKER proposa d'allonger la chronologie d'EMILIANI de 25 pour cent (1970) et ce, sur la base de datations très précises de coraux (1968b). De cette façon, et en imposant un déphasage de 6 000 ans - déphasage probablement lié à la réponse océanique (PISIAS et al., 1975) - entre le maximum d'insolation et le relèvement eustatique subséquent, les quatre dernières transgressions marines les plus importantes (122, 103, 82, 5×10^3 BP) coïncident parfaitement avec les maxima de la courbe d'insolation d'été "modifiée" par lui (MESOLELLA et al., 1969) : (127, 106, 82, 11×10^3 BP).

En fait, il se base sur la courbe d'insolation de 45°N de façon à faire apparaître le maximum de 106 000 BP et disparaître celui de 50 000 BP présent à 65°N. Ce même type de corrélation a été mis en évidence par VEEH et CHAPPELL (1970) pour les 230 000 dernières années, entre les variations du niveau des mers dérivées des terrasses des récifs coralliens de Nouvelle Guinée et les variations de cette même insolation à 45°N.

Sans vouloir prétendre que ces coïncidences sont fortuites, il apparaît cependant qu'elles semblent entachées d'une spéculation basée sur une idée préconçue de la part de ceux qui les présentent. Ainsi, RUDDIMAN et McINTYRE (1976) proposent l'insolation à 55°N et VAN DEN HEUVEL (1966a) estime, pour sa part, que les latitudes à retenir pour expliquer l'influence déterminante de l'insolation sur le climat des âges glaciaires, doivent être supérieures à 70°, car la dissymétrie entre les hémisphères nord et sud y est largement atténuée.

Dans le même ordre d'idée, EVANS (1972) proposa d'associer les courbes d'insolation de 65°N et 65°S, ce qui lui permit, en tenant compte d'un déphasage de 4 000 ans, d'établir une échelle de datation absolue pour le Pléistocène. Remarquons que ceci est en opposition avec FAIRBRIDGE (1961) pour qui les latitudes de 40° à 75°N, comprenant les 95 pour cent des glaciers de montagnes du monde, sont définitivement les seules latitudes sensibles en ce qui concerne les changements de climat. Notons finalement que KUKLA (1972) propose encore une autre alternative. Sans nécessairement établir un lien de cause à effet, il montre qu'une corrélation positive existe entre d'une part, les périodes où sur tout l'hémisphère nord les hivers consécutifs reçoivent une insolation toujours plus grande et, d'autre part, les interglaciaires tels que l'Eem et l'Holocène. Cette affirmation renforce, évidemment, la prévision d'un intervalle froid à l'échelle du Quaternaire pour les 8 000 prochaines années (*).

Pour clore ce paragraphe, il nous paraît finalement indispensable de noter, en ce qui concerne ces corrélations, qu'une relation de cause à effet ne peut être établie, avec quelque degré de confiance, que si les deux séries d'événements à caractère ondulatoire sont datées indépendamment l'une de l'autre et que si les échantillons sont statistiquement comparables. La datation des paléoclimats réels, à partir des courbes d'insolation de Milankovitch par la seule identification de leurs maxima et minima respectifs, est donc illusoire, puisqu'elle conduit toujours à un accord apparent, la chronologie des événements climatiques géologiques étant dans ce cas inconnue et pouvant être modifiée à souhait. Ainsi, à partir de la constatation d'un accord satisfaisant entre les trois premiers minima de la courbe d'insolation d'été à 65°N déterminée par van WOERKOM (22, 70, 115 x 10³ BP) et ceux de la courbe des paléotempératures d'EMILIANI, datée par ROSHOLT, les vitesses de sédimentation estimées par EMILIANI furent d'abord modifiées pour que le parallélisme entre les deux courbes soit parfait, avant qu'une chronologie maîtresse indépendante et largement plus longue soit enfin établie par EMILIANI et SHACKLETON (1974).

Le second critère utilisé pour étudier la vraisemblance de la théorie de Milankovitch est la recherche des quasi-périodicités et leur identification à celles de la théorie des variations à longues périodes des éléments de l'orbite terrestre, périodes dont les plus couramment citées sont celles de 21 000, 40 000 et 92 000 ans cor-

(*) L'auteur attire ici l'attention sur le fait que cette prévision pratiquement certaine, n'est aucunement en contradiction - car elle se situe à une toute autre échelle - avec les prévisions à échéance de quelques centaines d'années, liées essentiellement à l'action de l'homme sur le climat: qu'il s'agisse de la création d'un super-interglaciaire temporaire (MITCHELL, 1977) ou d'une accélération du refroidissement (BRYSON et WENDLAND, 1975).

respondant respectivement aux périodes du paramètre de précession $e \sin \tilde{\omega}$, de l'obliquité ϵ et de l'excentricité e . Telle est, par exemple, l'idée de FAIRBRIDGE (1961), WILSON (1966) ou encore VAN DEN HEUVEL (1966b). Ce dernier, après avoir repris la théorie du climat mathématique de Milankovitch, étudia, en effet, les courbes de paléotempératures d'EMILIANI par analyse spectrale et y mit en évidence les périodes de 12 825 et 40 000 ans avec des seuils de signification indiscutables. Cette période de 13 000 ans est aussi présente dans le contenu en $^{18}O/^{16}O$ de la carotte du Groenland (DANSGAARD et al., 1969), contenu dont la variation, image de la variation du volume de glace continentale, étant en phase avec la variation de la distance Terre-Soleil au solstice d'été, permettrait d'associer cette période à la précession. De plus, KARLSTRÖM (1961) décela une période de 1 700 ans dans l'histoire glaciaire de l'Alaska. Celle-ci correspondrait à un cycle d'intensité maximale des marées pouvant affecter les interfaces des masses d'eau océanique et modifiant, en cela, le modèle de Milankovitch-Petterson. Une combinaison subtile des harmoniques de 1 700 ans lui permit finalement de retrouver les cycles de la théorie astronomique ($20\ 400 = 12 \times 1\ 700, \dots$).

Il est à remarquer que, pendant longtemps (EMILIANI, 1955), la période de 40 000 ans fut seule reconnue. Progressivement, la période et le rôle joué par la précession (CHAPPELL, 1974) et l'excentricité (U.S. Federal Council, 1974) apparurent tout aussi nettement. Les résultats les plus significatifs en ce qui concerne les périodicités sont toutefois ceux obtenus récemment par HAYS et al. (1976) et BERGER (1977a). Les périodes de 19 500 et 24 000 yr tirées des carottes océaniques ne sont, en effet, pas significativement différentes des périodes associées aux termes les plus importants du développement en série du paramètre de précession $e \sin \tilde{\omega}$; les périodes avoisinant 42 000 ans sont essentiellement identiques à celles associées au terme prédominant du développement de l'obliquité; et le pic de quelque 106 000 ans, qui contient le maximum de variance, peut être considéré comme résultant, à la fois, de l'excentricité où la moyenne des périodes associées aux termes principaux voisine 110 000 ans, et d'un battement entre les périodes caractéristiques de la précession. Ce parallélisme des spectres géologique et astronomique est encore renforcé par les résultats de MANN (1967) et de CHAPPELL (1973) qui mirent en évidence des périodes de l'ordre de 100 000 ans, 60 000, 51 000, 31 000 et 25 000 ans, périodes qui correspondent précisément à d'autres périodicités prévues par la théorie astronomique (BERGER, 1977a).

III. CRITIQUE DU MODELE CLIMATIQUE.

Les principales critiques à la théorie de Milankovitch viennent de ceux qui tentent d'expliquer quantitativement les corrélations éventuelles entre les caractéristiques astronomiques de l'orbite terrestre, l'insolation disponible à la surface de la Terre et la température, corrélations qui sont essentiellement fonction du modèle climatologique utilisé.

Ainsi, le modèle très simple utilisé par Milankovitch conduit à des résultats que beaucoup de climatologues ont déjà mis et remis en doute. En effet, il néglige non seulement les effets de la circulation atmosphérique en considérant uniquement une atmosphère au repos, mais il utilise aussi un certain nombre d'hypothèses inadéquates quant à l'étude du bilan énergétique lui-même :

- la surface de la Terre y est uniformément plane et sans contraste Océan-Continents, le rayonnement infrarouge étant calculé comme si la surface était uniquement formée de terres;
- l'atmosphère est considérée comme un corps gris dont on sait qu'il donne, en pratique, de trop mauvais résultats pour être réellement valables, l'analyse détaillée du spectre d'absorption s'avérant

indispensable;

- les conditions d'absorption étant considérées comme simplement proportionnelles à l'épaisseur de l'atmosphère traversée, la réfraction et la composition de l'atmosphère ne changent pas au cours du temps.

SIMPSON (1940), un des premiers, refit les calculs de Milankovitch en considérant cette fois une transmission sélective du rayonnement et obtint des changements de température nettement insuffisants pour déclencher un âge glaciaire. Cependant, la technique utilisée par SIMPSON et les hypothèses simplificatrices concernant notamment l'identification de la température moyenne du mois le plus chaud (froid) et de la température moyenne de l'été (hiver), ainsi que l'invariance des conditions météorologiques dans le temps, lui valurent pas mal de critiques plausibles.

Malgré tout, bon nombre des objections à la théorie de Milankovitch continuent à provenir du fait que les variations séculaires des éléments astronomiques de l'orbite terrestre simulent souvent des changements thermiques insuffisants pour expliquer à eux seuls les glaciations et déglaciations du Quaternaire. Par exemple :

- (1) selon ÖPIK (1967), la différence thermique maximale, calculée à partir des insulations correspondant respectivement à une avance et à un retrait glaciaire, serait d'environ 1°C , ne représentant ainsi qu'un dixième de celle observée;
- (2) pour une augmentation de ϵ de 1° , ERIKSSON (1968) calcula la variation du gradient thermique annuel moyen ΔT entre l'équateur et le pôle, comme étant seulement $-0.0086 \Delta T$. Selon lui, les effets de ϵ et ω étant encore inférieurs à ceux de ϵ , la théorie astronomique pourrait difficilement engendrer un changement suffisant dans le transfert méridien de chaleur et dans la vigueur de la circulation générale que pour expliquer la formation d'âges glaciaires.
- (3) à partir d'un modèle zonal stationnaire, SELLERS (1970) obtint une différence de quelques dixièmes de degré seulement entre les températures correspondant au minimum et au maximum de l'obliquité.
- (4) SHAW et DONN (1968), bien qu'obtenant des températures de 2°C plus basses qu'actuellement à 65°N , conclurent encore à une inefficience de la théorie astronomique.

Cependant, aucun de ces auteurs n'utilise des modèles où les facteurs tels que contre-réaction d'albedo aux hautes latitudes, circulation et réponse océanique (NEWELL, 1974) y sont suffisamment pris en considération. En effet, si on tient compte de la modification saisonnière de la couverture de glace (VEEH et CHAPPELL, 1970) et des contre-réactions non-linéaires provoquées par l'extension des calottes polaires (ADAM, 1975; FREDERIKSEN, 1976), on s'aperçoit que les résultats deviennent largement plus significatifs. Tel est le cas, notamment, des modèles de JOHNSON et McCLURE (1976), SUAREZ et HELD (1976) et WEERTMAN (1976).

IV. CARACTÈRE UNIVERSEL DES GLACIATIONS.

A cause de l'allure même de la distribution d'énergie solaire en latitude et si on applique à la lettre la théorie de Milankovitch, on devrait s'attendre, pendant les glaciations des hautes latitudes nord, non seulement à une absence de glaciation dans les régions équatoriales, mais aussi à une antisymétrie avec l'hémisphère sud. Il apparaît donc nettement que des faits nouveaux doivent être mis en évidence si on veut concilier le caractère universel des glaciations (voir par exemple, WILLIAMS M., 1975; WYRWOLL et MILTON, 1976 et la théorie astronomique.

La variation saisonnière de la formation de glace dans les mers polaires (UNTERSTEINER, 1975) en est incontestablement un. En effet, la couverture moyenne annuelle de la glace dans l'Arctique, à l'heure actuelle, est d'environ $9.4 \times 10^6 \text{ km}^2$, répartie en $8.4 \times 10^6 \text{ km}^2$ en été et $15.0 \times 10^6 \text{ km}^2$ en hiver. Aux latitudes polaires australes, le continent Antarctique ayant été couvert de glace bien avant la Période Glaciaire du Quaternaire, la banquise subantarctique peut être considérée comme un paramètre sensible aux variations climatiques du Quaternaire. Aujourd'hui, dans les océans circum-Antarctique, la couverture moyenne de glace est d'environ $12 \times 10^6 \text{ km}^2$, répartie en $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$, en été, et $20 \times 10^6 \text{ km}^2$, en hiver. Ces observations montrent clairement que dans l'Océan Arctique, 60% de la glace ne fond pas pendant l'été boréal et que, dans les océans subantarctiques, la majeure partie de la glace se forme en hiver. En conséquence, c'est la faible fonte pendant l'été boréal et la quantité énorme de glace formée pendant l'hiver austral qui semblent être déterminantes pour le taux d'accumulation de la glace dans ces régions polaires. Ceci est évidemment en accord parfait avec l'hypothèse de Milankovitch, car les étés "frais" (à comprendre du point de vue insolation) de l'hémisphère nord et les hivers "froids" de l'hémisphère sud sont évidemment synchrones.

V. EXTENSION DE LA THEORIE ASTRONOMIQUE DE MILANKOVITCH.

Le cycle astronomique glaciaire-interglaciaire étant à caractère périodique, il semble bien admis qu'il ne puisse être considéré comme une condition suffisante pour la formation d'une époque glaciaire. D'autres facteurs, tels que la tectonique des plaques (DONN et SHAW, 1975), l'orogénèse (GULLENTOPS, 1958), le volcanisme (LAMB, 1971), la variation de l'activité solaire (WILLETT, 1976) doivent créer les conditions favorables pré-requises avant que ne puissent intervenir les variations astronomiques proprement dites. Il est très probable que la théorie de Milankovitch sert alors essentiellement de déclenchement et de modulation aux variations climatiques (BERGER, 1977b).

C'est au vu de la difficulté de simuler les climats anciens à partir des seuls paramètres fournis par Milankovitch et de l'analyse du spectre présenté par HAYS et al., que proviennent les premiers éléments d'une nouvelle approche de la théorie astronomique, sous la forme d'une extension de celle de Milankovitch.

En premier lieu, il faut analyser l'origine de la période de 106 000 ans. Elle peut s'expliquer de deux manières différentes : elle peut résulter d'une interaction non linéaire entre les fréquences propres à la précession (WIGLEY, 1976), mais aussi être directement liée à l'excentricité.

En effet :

- (1) la période moyenne de l'excentricité sur les 5 derniers millions d'années est 95 800 ans.
- (2) le développement en série de e fait apparaître des termes importants dont les périodes sont 95 000, 100 000 et 123 000 ans.
- (3) les figures présentées par HAYS et al. (1976), RUDDIMAN et MCINTYRE (1976) et IMBRIE et KIPP (1971), suggèrent une corrélation positive entre température estivale et excentricité, contrairement à ce que requiert la théorie de Milankovitch qui établit l'influence de e presque exclusivement à travers le facteur $e \sin \omega$. Si cette corrélation positive devait se confirmer, l'action de e seul sur le climat devrait être considérée. Ceci conduirait, en fait, à prendre en considération la variation de l'insolation totale reçue sur la Terre, car celle-ci est effectivement fonction de $(1-e^2)^{-1/2}$: même si l'influence de ce facteur est très faible, elle va toutefois dans le sens requis.

De plus, il semble bien que le pic correspondant à l'obliquité dans les données géologiques soit moins important que le pic de 100 000 ans, et certainement moins dominant que considéré précédemment. Afin de pouvoir interpréter cette constatation, il faut se rappeler les relations suivantes :

- d'une part (1) l'insolation reçue aux équinoxes et la différence de longueur des saisons astronomiques d'été et d'hiver sont seulement fonction du paramètre de précession, et (2) aux solstices, ce paramètre $e \sin \omega$ a une influence beaucoup plus grande que l'obliquité.
- d'autre part : (3) durant les saisons astronomiques, l'insolation reçue à toute latitude est une fonction de ϵ et (4) l'écart à sa valeur actuelle de l'insolation calorique est principalement une fonction de ϵ .

Par conséquent, la prépondérance de cette période, liée à la fois à l'excentricité et à la précession, dans les données géologiques, portent à croire que le contraste saisonnier et l'insolation aux équinoxes ou mieux l'insolation mensuelle, doit être considérée dans la simulation des variations climatiques du Quaternaire et ce, en plus, voire en remplacement, des insolutions astronomiques ou caloriques usuelles.

VI. CONCLUSIONS.

Ces déductions sont en plus renforcées par les observations actuelles des fluctuations de la couverture neigeuse (KUKLA et KUKLA, 1974; WILLIAMS L., 1975) qui conduisirent KUKLA (1975) à considérer l'insolation automnale comme paramètre fondamental dans l'étude de la relation théorie astronomique-paléoclimat. Finalement, l'ensemble de ces considérations auxquelles est venue s'adjoindre la puissance des modèles saisonniers (VERNEKAR, 1977; GATES, 1976; STONE et al., 1977), voire mensuels (ADEM, 1975; SELLERS, 1976), amenèrent l'auteur (BERGER, 1976b) au calcul des variations à longues périodes de l'insolation journalière et mensuelle.

A partir de la valeur des éléments de l'orbite terrestre e , ϵ , et ω (BERGER, 1976a), un programme simple a été développé afin de permettre un calcul rapide des insolutions journalières ou mensuelles pour toute date du passé historique (BERGER, 1978). Nous reproduisons ici les valeurs de l'insolation disponible à l'heure présente tous les 20 du mois environ, pour toutes les latitudes de 10 en 10 degrés et ce, dans l'hypothèse d'une atmosphère parfaitement transparente (Tableau 1). Les variations de l'écart à la valeur actuelle, de l'insolation disponible à l'équinoxe d'automne, est alors représentée graphiquement pour le dernier million d'années (Figs. 2 a-j) et les 100 prochains milliers d'années (Fig. 2k).

Il est à remarquer que les minima de la courbe de SHACKLETON et OPDYKE (1973) correspondent mieux à des époques où l'insolation automnale fut minimale : notamment le minimum d'insolation correspondant à la dernière extension glaciaire est ici localisé à 18 000 BP et non plus à 25 000 BP comme c'est le cas pour l'insolation calorique d'été à 65°N.

Réunion BELQUA
GAND
10 janvier 1978.

Tableau 1. Insolation journalière actuelle ($\text{cal cm}^{-2} \text{ jour}^{-1}$) reçue de 10 en 10° de latitude, dans l'hypothèse d'une atmosphère parfaitement transparente et pour chaque mois (le 20 environ).

LAT	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUNE	JULY	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
90	0	0	0	553	944	1081	937	546	0	0	0	0
80	0	0	156	545	930	1065	923	538	154	0	0	0
70	0	87	308	604	887	1016	881	597	304	86	0	0
60	92	229	450	700	904	984	898	692	444	226	91	50
50	229	374	579	786	939	994	932	776	571	370	227	177
40	374	513	690	852	961	996	954	842	680	507	372	322
30	518	639	780	895	961	980	954	884	769	631	514	469
20	651	747	846	912	938	940	931	901	835	738	646	609
10	768	834	887	903	890	878	884	892	875	824	763	737
0	866	896	901	867	819	794	813	857	888	886	861	848
- 10	942	933	887	807	726	690	721	797	875	922	935	937
- 20	992	942	846	723	615	570	611	714	835	931	986	1004
- 30	1017	924	780	618	489	439	486	611	769	913	1010	1046
- 40	1017	880	690	496	354	301	351	490	680	870	1010	1064
- 50	994	812	579	362	216	166	214	358	571	802	987	1061
- 60	957	723	450	221	87	47	86	219	444	715	950	1050
- 70	939	624	308	84	0	0	0	83	304	617	932	1085
- 80	984	563	156	0	0	0	0	0	154	556	977	1137
- 90	999	571	0	0	0	0	0	0	0	565	992	1154

Figs. 1 a-k. - Ecart à sa valeur actuelle de l'insolation journalière (cal cm^{-2} jour $^{-1}$) disponible à l'équinoxe d'automne dans l'hypothèse d'une atmosphère parfaitement transparente. Les isolignes ont été tracées tous les 20 cal cm^{-2} jour $^{-1}$ (excepté pour les 100 derniers et prochains milliers d'années où elles sont tracées tous les 10 cal cm^{-2} jour $^{-1}$); les écarts positifs, valeurs du passé géologique supérieures à la valeur actuelle, sont représentés en traits pleins et les écarts négatifs en traits discontinus. Chaque figure représente 10^5 ans du passé (a-j) ou les 10^5 prochaines années (k).

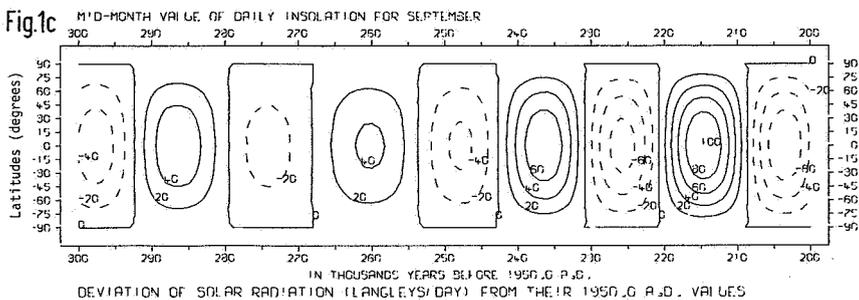
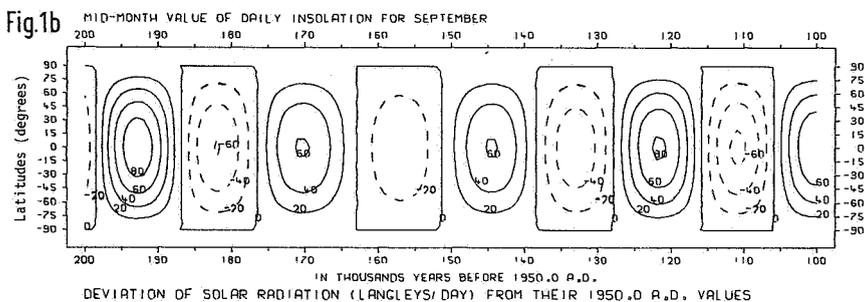
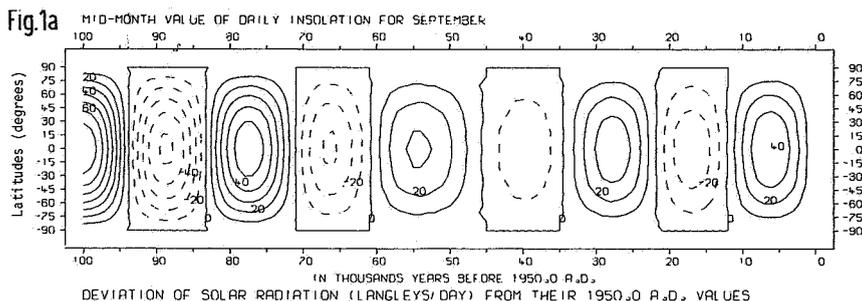
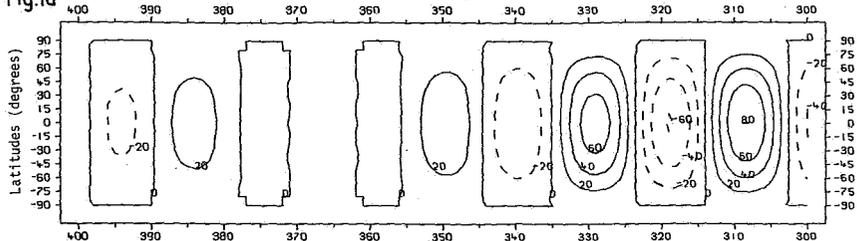


Fig.1d

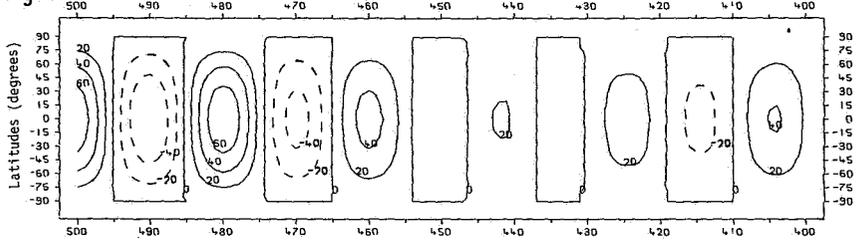
MID-MONTH VALUE OF DAILY INSOLATION FOR SEPTEMBER



DEVIATION OF SOLAR RADIATION (LANGLEYS/DAY) FROM THEIR 1950.0 A.D. VALUES

Fig.1e

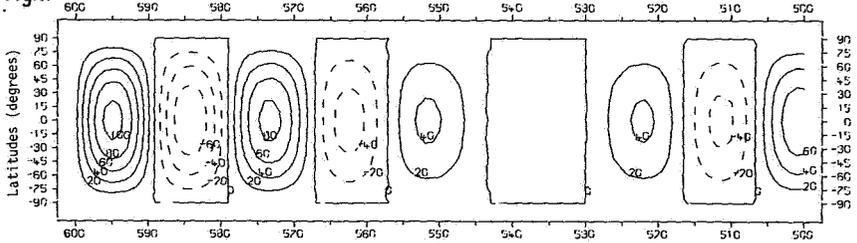
MID-MONTH VALUE OF DAILY INSOLATION FOR SEPTEMBER



DEVIATION OF SOLAR RADIATION (LANGLEYS/DAY) FROM THEIR 1950.0 A.D. VALUES

Fig.1f

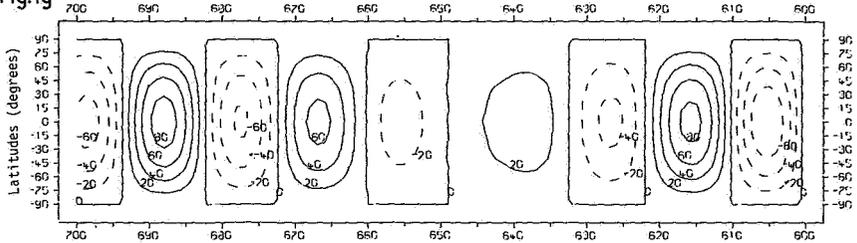
MID-MONTH VALUE OF DAILY INSOLATION FOR SEPTEMBER



DEVIATION OF SOLAR RADIATION (LANGLEYS/DAY) FROM THEIR 1950.0 A.D. VALUES

Fig.1g

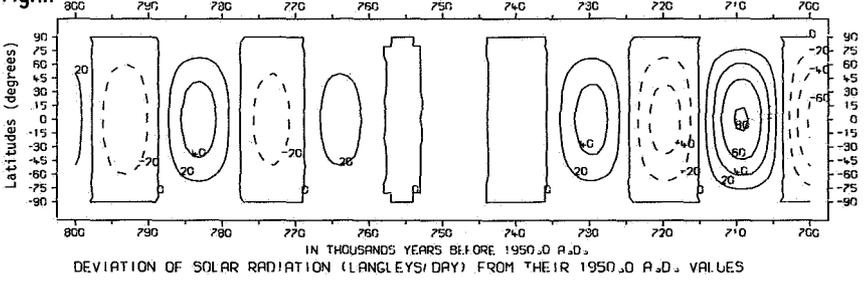
MID-MONTH VALUE OF DAILY INSOLATION FOR SEPTEMBER



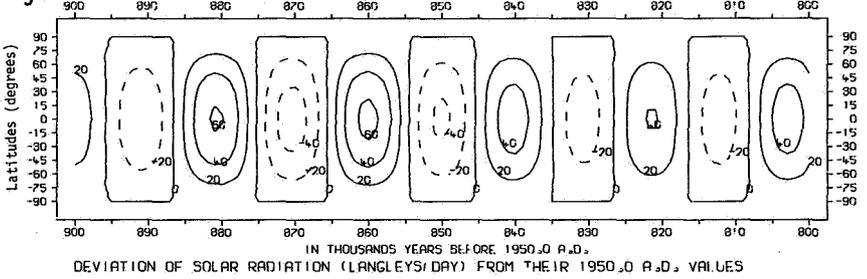
DEVIATION OF SOLAR RADIATION (LANGLEYS/DAY) FROM THEIR 1950.0 A.D. VALUES

Fig.1h

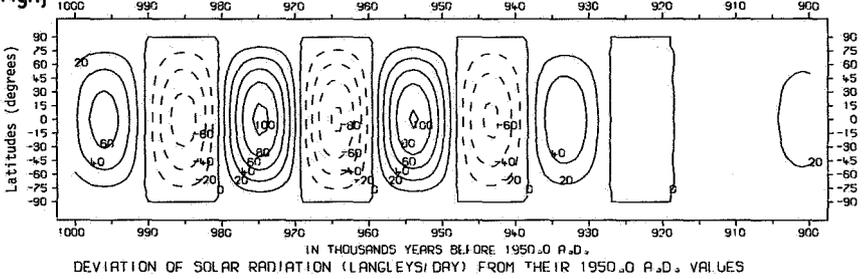
MID-MONTH VALUE OF DAILY INSOLATION FOR SEPTEMBER

**Fig.1i**

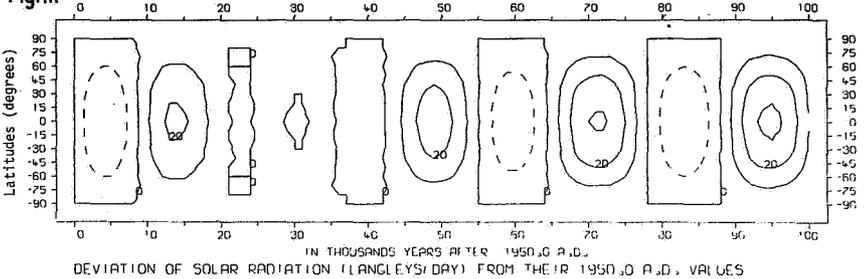
MID-MONTH VALUE OF DAILY INSOLATION FOR SEPTEMBER

**Fig.1j**

MID-MONTH VALUE OF DAILY INSOLATION FOR SEPTEMBER

**Fig.1k**

MID-MONTH VALUE OF DAILY INSOLATION FOR SEPTEMBER



BIBLIOGRAPHIE.

- ADAM, D.P. (1975) - Ice Ages and thermal equilibrium of the Earth. - *Quaternary Research*, 5, 161-171.
- ADEM, J. (1975) - Numerical-thermodynamical prediction of mean monthly ocean temperature. - *Tellus*, 27, 541-551.
- ADHEMAR, J.F. (1842) - *Revolutions de la Mer, Déluges Périodiques.* - Paris.
- BERGER, A.L. (1975a) - The astronomical theory of paleoclimates : a cascade of accuracy. in : "Proceedings of the WMO-IAMAP Symposium on Long-Term Climatic Fluctuations". - WMO n°421, 65-72. *World Meteorological Organization, Geneva.*
- BERGER, A.L. (1975b) - Détermination de l'irradiation solaire par les intégrales elliptiques. - *Annales Société Scientifique de Bruxelles*, 89, 69-91.
- BERGER, A.L. (1976a) - Obliquity and precession for the last 5 000 000 years. - *Astronomy and Astrophysics*, 51, 127-135.
- BERGER, A.L. (1976b) - Long-term variations of daily and monthly insolation during the last Ice Age. - *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 57, 254.
- BERGER, A.L. (1977a) - Support for the astronomical theory of climatic change. - *Nature (London)*, 269, 44-45.
- BERGER, A.L. (1977b) - Power and limitation of an energy-balance climate model as applied to the astronomical theory of paleoclimates. - *Paleogeography, Climatology and Ecology*, 21, 227-235.
- BERGER, A.L. (1977c) - Long-term variation of the earth's orbital elements. - *Celestial Mechanics*, 15, 53-74.
- BERGER, A.L. (1978) - Long-term variations of caloric insolation resulting from the earth's orbital elements. - *Quaternary Research*, 9, 139-167.
- BERGER, A.L. (1978) - A simple algorithm for the computation of the long-term variations of the daily insolation. - *Contribution 18, Institut Astronomie et Géophysique, Louvain-la-Neuve.*
- BERNARD, E. (1962) - Théorie Astronomique des Pluviaux et Interpluviaux du Quaternaire Africain. - *Nouvelle Série XII, fasc. 1, Acad. Roy. Sc. Outre-Mer. Cl. Sc. Nat. et Méd., Bruxelles.*
- BRETAGNON, P. (1974) - Termes à longues périodes dans le système solaire. - *Astronomy and Astrophysics*, 30, 141-154.
- BROECKER, W.S. (1966) - Absolute dating and the astronomical theory of glaciation. - *Science*, 151, 299-304
- BROECKER, W.S. (1968a) - In defense of astronomical theory of glaciation. - *Meteorological Monographs*, 8 (30), 139-141.
- BROECKER, W.S. (1968b) - Milankovitch hypothesis supported by precise dating of coral reefs and deep-sea sediments. - *Science*, 159, 297-300.
- BROECKER, W.S. and VAN DONK, J. (1970) - Insolation changes, ice volume and the O^{18} record in deep-sea cores. - *Review of Geophysics and Space Physics*, 8 (1), 169-198.
- BROUWER, A. (1950) - Vormen de stralingscurven van Milankovitch een bruikbare grondslag voor de indeling van het Pleistocene ? - *Geol. Mijnbouw*, 12 (1), 9-11.

- BROUWER, D. and van WOERKOM, A.J.J. (1950) - Secular variations of the orbital elements of principal planets. - *Astron. Papers, Am. Ephemeris*, 13, part 2, 81-107.
- BRYSON, R.A. and WENDLAND, W.M. (1975) - Climatic effects of atmospheric pollution. in : "Changing Global Environment". - (Singer, S.F., Ed.), 139-149. Reidel, Dordrecht et Boston.
- CHAPPELL, J. (1973) - Astronomical theory of climatic change : status and problem. - *Quaternary Research*, 3, 221-236.
- CHAPPELL, J. (1974) - Relationship between sea levels, ^{18}O variations and orbital perturbations during the past 250 000 years. - *Nature*, (London) 252, 199-202.
- CROLL, J. (1875) - Theory of Secular Changes of the Earth Climate, Climate and Time in their Geological Relations. - *Appleton, New York*.
- DANDGAARD, W., JOHNSEN, S.J., MØLLER, J. and LANGWAY, C. (1969) - One thousand centuries of climatic record from Camp Century on the Greenland ice sheet. - *Science*, 166, 377-381.
- DONN, W.L. and SHAW, D. (1975) - The evolution of climate. in : "Proceedings of the WMO-IAMAP Symposium on Long-Term Climatic Fluctuations". - WMO n°421, 53-63. *World Meteorological Organization, Geneva*.
- EMILIANI, C. (1955) - Pleistocene temperature. - *Journal of Geology*, 63, 538-578.
- EMILIANI, C. (1969) - Interglacial high sea levels and the control of greenland ice by the precession of the equinoxes. - *Science*, 178, 398-401.
- EMILIANI, C. and SHACKLETON, N.J. (1974) - The Brunhes epoch : isotopic paleotemperatures and geochronology. - *Science*, 183, 511-514.
- ERIKSSON, E. (1968) - Air-ocean-ice cap interaction in relation to climatic fluctuations and glaciation cycles. - *Meteorological Monographs*, 8 (30), 68-92.
- EVANS, P. (1972) - The present status of age determination in the Quaternary (with special reference to the period between 70 000 and 1 000 000 years ago). in : "Quaternary Geology". - *International Geological Congress, 24th session, section 12, 16-21, Montréal*.
- FAIRBRIDGHE, R.W. (1961) - Convergence of evidence on climatic change and ice ages. - *Annals of the New York Academy of Sciences*, 91 (1), 542-579.
- FREDERIKSEN, J.S. (1976) - Non-linear albedo-temperature coupling in climate models. - *Journal of Atmospheric Sciences*, 33, 2267-2272.
- GATES, W.L. (1976) - Modeling the Ice-Age climate. - *Science*, 191, 1138-114.
- GRIBBIN, J. (1976) - Mason develops Ice Age theory. - *Nature (London)*, 260, 396.
- GRIBBIN, J. (1977) - Tuning climate's fine control. - *New Scientist*, september, 1, 530.
- GULLENTOPS, F. (1958) - La cause des glaciations. - *Revue des Questions Scientifiques*, 19, 221-235.
- HAYS, J.D., IMBRIE, J. and SHACKLETON, N.J. (1976) - Astronomical theory of Ice Ages confirmed. - *Science*, 194, 1121-1132.
- IMBRIE, J. and KIPPS, N.G. (1971) - A new micro-paleontological method for quantitative paleoclimatology : application to a late pleistocene caribbean core. in : "Late Cenozoic Glacial Ages" - (Turekian K.K., Ed.), 71-182, *Yale University Press, New Haven et London*.

- JARDETSKY, W.S. (1961) - Investigations of Milankovitch and Quaternary curve of effective solar radiation. - *Annals of the New York Academy of Sciences*, 95, 118-423.
- JOHNSON, R.G. et McCCLURE, B.T. (1976) - A model for northern continental ice sheet variation. - *Quaternary Research*, 6, 325-355.
- KARLSTRÖM, T. (1961) - Glacial history of Alaska : its bearing on paleoclimatic theory. - *Annals of the New York Academy of Sciences*, 95(1), 290-340.
- KOPPEN, W. und WEGENER, A. (1924) - Die Klimate der Geologischen Vorzeit. - Berlin.
- KUKLA, G.J. (1975) - Missing link between Milankovitch and climate. - *Nature (London)*, 253, 600-603.
- KUKLA, G.J. (1976) - Revival of Milankovitch. - *Nature (London)*, 261, 11.
- KUKLA, G.J. and KUKLA, H.J. (1972) - Insolation regime of interglacials. - *Quaternary Research*, 2, 412-424.
- KUKLA, G.J. and KUKLA, H.J. (1974) - Increased surface albedo in Northern Hemisphere. - *Science*, 183, 709-714.
- LAMB, H.H. (1970) - Climatic variation and our environment today and in the coming years. - *Weather*, 25 (10), 447-455.
- LAMB, H.H. (1971) - Volcanic activity and climate. - *Paleogeography, Climatology, Ecology*, 10, 203-230.
- LAMB, H.H., LEWIS, R.P.W. and WOODROFFE, A. (1966) - Atmospheric circulation and the main climatic variables between 8 000 and 0 B.C. (Sheppard, P.A., Ed.). - 174-217, *Royal Meteorological Society, London*.
- MANN, J. (1967) - Spectral density analysis of stratigraphic data. in : "Computer Applications in the Earth Sciences, Colloquium on Time Series Analysis". - (Merriam D.F., Ed.). - *Computer Contribution 18. State Geological Survey, Lawrence*.
- MASON, B.J. (1976) - Toward the understanding and prediction of climatic variations. - *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102, 473-499.
- MESOLELLA, K.J., MATTHEWS, R.K., BROECKER, W.S. and THERBER, D.L. (1969) - The astronomical theory of climatic change : Barbados data. - *J. of Geology*, 77, 250-274.
- MILANKOVITCH, M. (1920) - Théorie Mathématique des Phénomènes Thermiques produits par la Radiation Solaire. - *Académie Yougoslave des Sciences et des Arts de Zagreb, Gauthier Willard, Paris*.
- MILANKOVITCH, M. (1930) - Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie des Klimaschwankungen. - *Handbuch der Klimatologie, Band I, Teil A, Borntraeger, Berlin*.
- MILANKOVITCH, M. (1941) - Canon of Insolation and the Ice-Age Problem. Koniglich Serbische Akademie, Beograd. English translation by the Israel Program for Scientific Translations and published for the U.S. Department of Commerce and the National Science Foundation, Washington D.C.
- MITCHELL, J.M. Jr. (1976) - An overview of climatic variability and its causal mechanisms. - *Quaternary Research*, 6, 481-493.
- MITCHELL, J.M. Jr. (1977) - Carbon dioxide and future climate. - *EDS-NOAA, march 1977*.

- NEWELL, R.E. (1974) - Changes in poleward energy flux by the atmosphere-ocean as a possible cause for Ice Ages. - *Quaternary Research*, 4, 117-128.
- ÖPIK, E.J. (1967) - Climatic Changes. in : "International Dictionary of Geophysics". - Pergamon Press, Oxford. Armagh Observatory, Leaflet, 88.
- PILGRIM, L. (1928) - Die Berechnung der Eiszeiten auf Astronomischphysikalischer Grundlage. - *Ebenda*, Bd. 84
- PISIAS, N.G., HEATH, G.R. and MOORE, T.G. Jr. (1975) - Lag times for oceanic responses to climatic change. - *Nature (London)*, 256, 716-717.
- RUDDIMAN, W.F. and McINTYRE, A. (1976) - Northeast Atlantic Paleoclimatic changes over past 600 000 years. in : "Investigation of Late Quaternary Paleoceanography and Paleoclimatology" (Cline, R.M. et Hays, J., Eds.). - *Geological Society of America, Memoir 145, 111-146, Geological Society America, Inc. Boulder*
- SELLERS, W.D. (1970) - The effect of changes in the earth's obliquity on the distribution of mean annual sea-level temperatures. - *Journal of Applied Meteorology*, 9, 960-961.
- SELLERS, W.D. (1976) - A two-dimensional global climatic model. - *Monthly Weather Review*, 104, 233-248.
- SHACKLETON, N.J. and OPDYKE, N.D. (1973) - Oxygen Isotope and paleomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific core V28-238 : oxygen isotope temperature and ice volume on a 10^5 and 10^6 year scale. - *Quaternary Research*, 3, 39-55.
- SHARAF, S.G. and BOUDNIKOVA, N.A. (1967) - Secular perturbations in the elements of the earth's orbit and the astronomical theory of climate variations. - *Trudy Institute Teoreticheskoi Astronomii*, 14, 48-84 (en russe).
- SHAW, D.M. and DONN, W.L. (1968) - Milankovitch radiation variations, a quantitative evaluation. - *Science*, 162, 1270-1272.
- SIMPSON, G.C. Sir, (1940) - Possible causes of change in climate and their limitations. - *Proc. Linn. Soc. (London)*, 152, 190-219.
- SPITALER, R. (1943) - Die Bestrahlungskurve der Eiszeit nach Milankovitch and Spitaler. - *Abh. Deutsch. Akad. Wiss. Prog. (Math. Nat.)*, 13.
- STONE, P.H., CHOW, S. and QUIRK, W.J. (1977) - The July climate and a comparison of the January and July Climates simulated by the Giss General Circulation model. - *Monthly Weather Review*, 105, 170-194.
- SUAREZ, M.J. and HELD, I.M. (1976) - Modeling climatic response to orbital parameter variations. - *Nature (London)*, 263, 46-47.
- UNTERSTEINER, N. (1975) - Sea ice and ice sheets and their role in climatic variations. in : "The Physical Basis of Climate Modeling", 206-224, *GARP publication n°16, World Meteorological Organization, Geneva*.
- U.S. FEDERAL COUNCIL FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY, Interdepartmental Committee for Atmospheric Science (1974) - Report of the Ad Hoc Panel on the Present Interglacial. - *ICAS Report 18b - FY75*.
- van den HEUVEL, E.P.J. (1966a) - Ice shelf theory of Pleistocene glaciations. - *Nature*, 210, 363-365.
- van den HEUVEL, E.P.J. (1966b) - On the precession as a cause of Pleistocene variations of Atlantic ocean water temperatures. - *Geophys. J. Astr. Soc.*, 11, 323-336.

- VAN WOERKOM, A.J.J. (1953) - Astronomical theory of climatic change. in : "Climatic Change" (Shapley, H., Ed.) 147-157, *Harvard University Press, Cambridge*.
- VEEH, H.H. and CHAPPELL, J. (1970) - Astronomical theory of climatic change : support from New Guinea. - *Science*, 167, 862-865.
- VERNEKAR, A.D. (1972) - Long-period global variations of incoming solar radiation. - *Meteorological monographs*, 12, N°34.
- VERNEKAR, A.D. (1977) - An astronomical theory of Ice Ages. - *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 58, 339
- WEERTMAN, J. (1976) - Milankovitch solar radiation variations and ice age ice sheet sizes. - *Nature (London)*, 261, 17-20.
- WIGLEY, T.M.L. (1976) - Spectral analysis and astronomical theory of climatic change. - *Nature (London)*, 264, 629-631.
- WILLETT, H.H. (1976) - Sun as a maker of weather and climate. - *M.I.T. Technology Review*, 78, 46-55.
- WILLIAMS, L. (1975) - Effect of insolation changes on late summer snow cover in northern Canada. in : "Proceedings of the WMO-IAMAP Symposium on Long-Term Climatic Fluctuations". - WMO n° 421, 287-293, *World Meteorological Organization, Geneva*.
- WILLIAMS, M.A.J. (1975) - Late Pleistocene tropical aridity synchronous in both hemispheres. - *Nature (London)*, 253, 617-618.
- WILSON, A.T. (1966) - Variation in solar insolation to the south polar region as a trigger which induces instability in Antarctic sheet. - *Nature (London)*, 210, 477-478.
- WYRWOLL, K.H. and MILTON, D. (1976) - Widespread late Quaternary aridity in Western Australia. - *Nature (London)*, 264, 429-431.

CIMENTS D'OBourg

S.A.

Ciments Portland : P 30
P 40
P 50

Ciments de haut fourneau : HL 30
HK 40

Service commercial :

Boulevard du Régent, 46 - 1000 Bruxelles