

Les théories astronomiques du climat : une longue histoire

Auteurs :

BERGER André, Professeur Émérite et Chercheur Honoraire au Centre de Recherches sur la Terre et le Climat de l'Université catholique de Louvain.

YIN Qiuzhen, Chercheur Qualifié (Research Associate) du Fonds National de la Recherche Scientifique et professeur à l'Université catholique de Louvain.

09-04-2021



Quelles furent les périodes caractéristiques des variations climatiques au cours des derniers millions d'années ? Les responsables de ces variations naturelles sont les paramètres du mouvement de la Terre autour du Soleil : excentricité de sa trajectoire elliptique, obliquité et précession de son axe de rotation. Comment les astronomes du 18^e siècle ont-ils eu l'intuition des alternances de glaciations et de périodes interglaciaires ? Et sur quelles bases les climatologues du dernier siècle se sont-ils appuyés pour modéliser avec une assez bonne précision les variations réelles révélées par leurs traces géologiques ?

1. Les périodes astronomiques dans les données paléoclimatiques

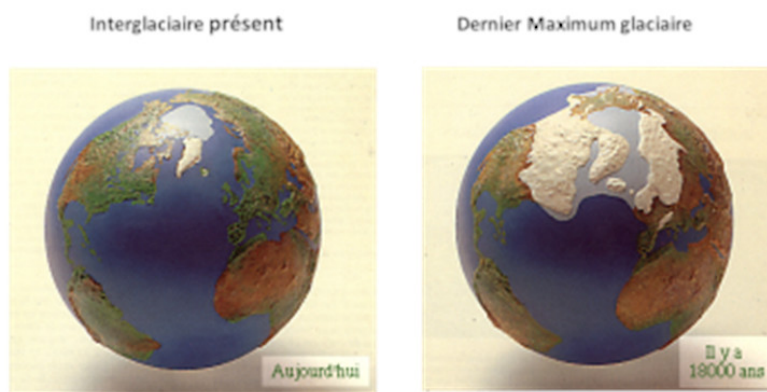


Figure 1. L'extension des glaces de l'hémisphère nord aujourd'hui et au dernier maximum glaciaire [Source : adapté de Joussaume S. de ref. [1]].

Les reconstructions de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre, de la température de l'air en Antarctique, de l'intensité de la mousson asiatique et du volume total de glace sur Terre ont permis de mettre en évidence les **cycles glaciaires-interglaciaires** qui caractérisent le climat des derniers millions d'années (Figure 1) [1],[2].

L'analyse spectrale [3] de ces séries temporelles [4] révèle des **périodes significatives** de 100 000 ans, de 41 000 ans, de 23 000 ans et 19 000 ans. Ces périodes caractérisent les variations à long terme de trois variables astronomiques liées à l'orbite de la Terre autour du Soleil (appelée **écliptique**) et à son axe de rotation : **l'excentricité**, **l'obliquité** et la **précession climatique** [5].

1.1. L'excentricité

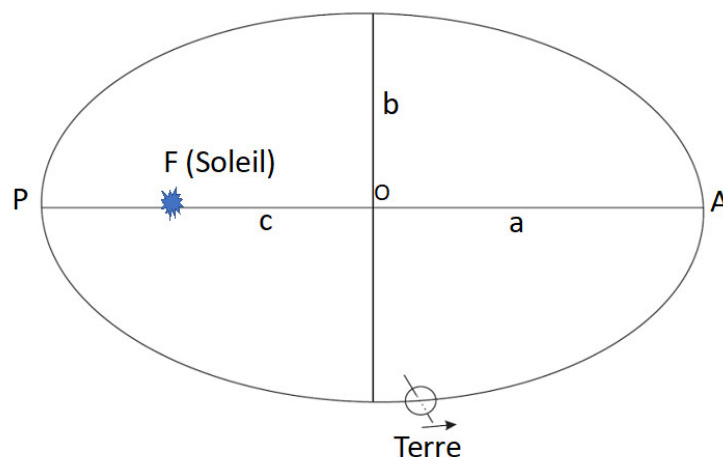


Figure 2. Orbite elliptique de la Terre autour du Soleil. O est le centre de l'ellipse, P le périhélie, A l'aphélie, F un des foyers de l'ellipse (occupé par le Soleil). La distance OF, C, est égale au produit de a et de l'excentricité e et vaut aussi la racine carrée de $(a^2 - b^2)$. Le dessin n'est pas à l'échelle pour des raisons de lisibilité. En réalité, l'orbite est pratiquement un cercle et le soleil est très proche de son centre. [Source : dessin des auteurs (A. Berger)]

L'excentricité est une mesure de la forme de l'orbite qui est elliptique selon la première loi de Johannes Kepler [6] (1571-1630) qui date de 1609. Cette forme varie dans le temps depuis un cercle parfait (dont l'excentricité est nulle) jusqu'à une **ellipse** qui est toutefois très peu différente d'un cercle lorsqu'elle est dessinée à l'échelle. Cette excentricité vaut actuellement 0,016 et varie au cours des derniers millions d'années entre 0 et 0,06. Si a est le demi- grand axe de l'ellipse et si b est le demi-petit axe (Figure 2), l'excentricité est définie par
$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}.$$

Comme le demi-grand axe est invariant, la variation de l'excentricité s'accompagne de la variation du seul demi-petit axe. Celui-ci augmente avec la diminution de e et finit par être égal au demi-grand axe lorsque l'excentricité s'annule. Le nouveau demi-petit axe va alors diminuer avec l'augmentation de e jusqu'à ce que celle-ci atteigne son maximum.

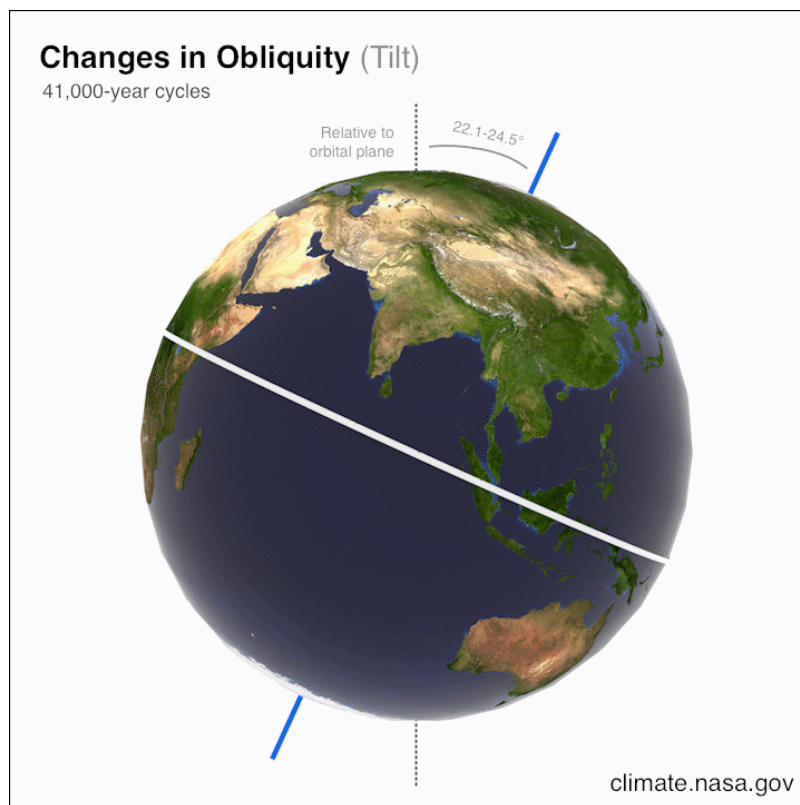


Figure 3. Animation représentant les modifications de l'obliquité [Source : NASA/JPL-Caltech https://climate.nasa.gov/internal_resources/2000/]

Les **variations de e** sont caractérisées par de multiples périodes dont la principale se situe aux alentours de 400 000 ans et quelques-unes sont proches de 100 000 ans [2]. Bien que l'orbite de la Terre soit quasiment un cercle, la différence de la distance Terre-Soleil entre le **périhélie** et l'**aphélie** [7], relativement au demi-grand axe, a , de l'orbite est actuellement de 3,4% (deux fois l'excentricité). Par conséquent cette même différence pour l'irradiance solaire [8], aussi appelée **insolation** [9], est de 6,8%.

1.2. L'obliquité

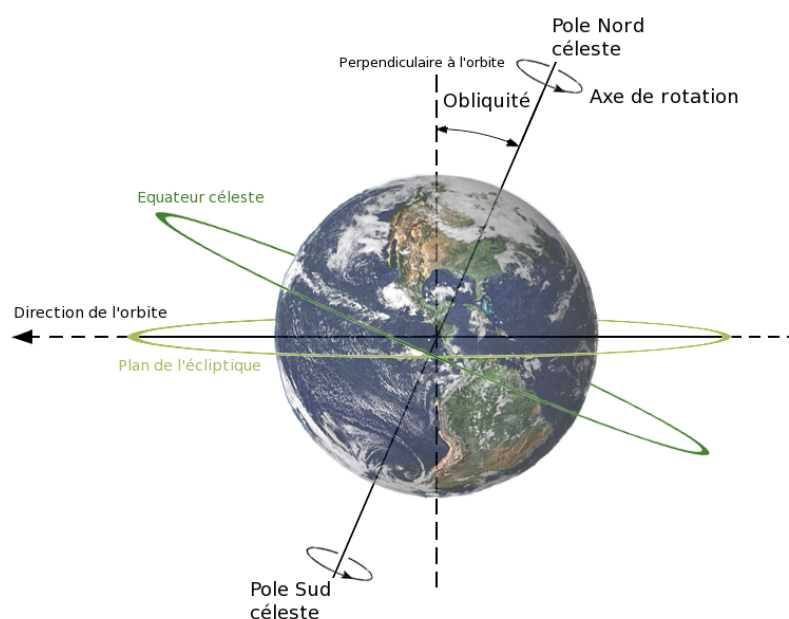


Figure 4. L'écliptique et sa relation avec l'équateur céleste et l'axe de rotation de la Terre. [Source : derivative work: Daelomin53 (talk)AxialTiltObliquity.png: Dna-webmaster, CC BY 3.0, via Wikimedia Commons]

L'obliquité est l'angle d'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur la perpendiculaire au plan de l'écliptique. Il vaut

actuellement $23^{\circ}27'$ et varie entre 22° et 25° avec une période majeure de 41 000 ans. C'est l'obliquité qui définit les **tropiques** et les **cercles polaires** (Figure 3 et 4). Elle diminue aujourd'hui de $46,8''$ par siècle, ce qui explique le déplacement des tropiques vers l'équateur de 1,4 km par siècle ou de manière équivalente des cercles polaires vers les pôles. C'est elle qui est à l'origine des saisons.

1.3. La précession climatique

L'axe de rotation de la Terre pointe actuellement vers l'**étoile polaire**, *Alpha Ursae Minoris*, dans l'hémisphère **nord**. Cet axe, en plus de la variation de son inclinaison sur la perpendiculaire au plan de l'écliptique, se déplace en formant dans l'espace un cône presque parfait dont l'ouverture est l'obliquité. Ce mouvement est celui de la **précession astronomique**, un décalage progressif de la direction où sont vues les étoiles (Figures 4, 5 et 6) dont la période est de 25 760 ans. Il est associé au mouvement **rétrograde** (horlogique) du point vernal sur l'écliptique qui est de $50,29$ secondes d'arc par an. Ce dernier est en effet défini à l'intersection de l'équateur et de l'écliptique (Figure 4).

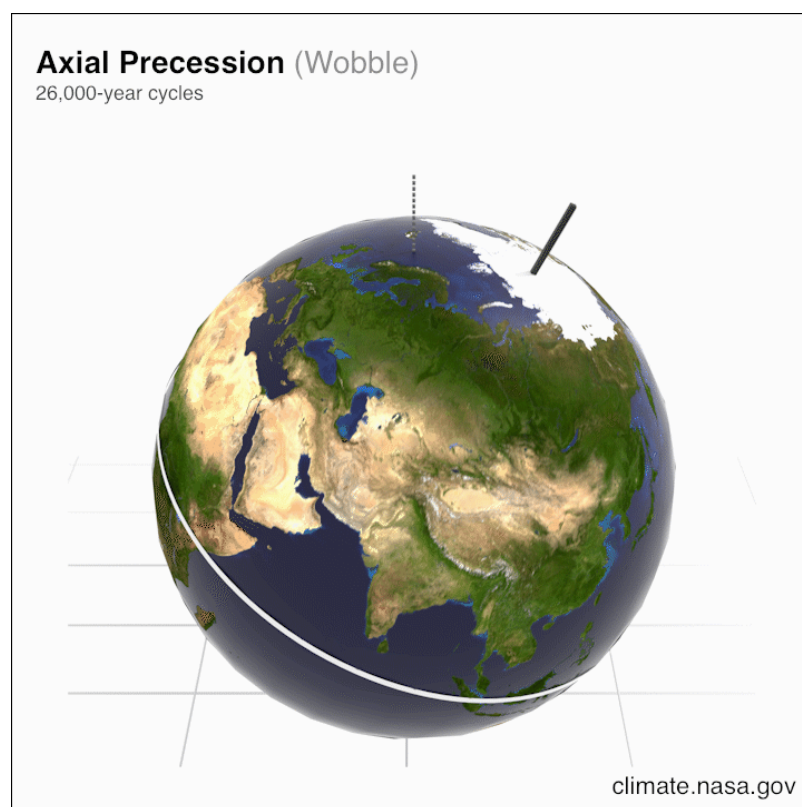


Figure 5. Animation représentant la précession astronomique. Le mouvement horlogique représenté est celui vu de l'espace. Il est opposé à celui vu de la Terre représenté dans la figure suivante. [Source : NASA/JPL-Caltech https://climate.nasa.gov/internal_resources/2001/]

La **précession climatique** est un paramètre fondamental dans l'étude des variations du climat de la Terre. Elle résulte de la précession astronomique et de celle du périhélie (la précession apsidale). Elle est définie à partir d'un **angle** formé entre la position du **périhélie** et la position du **point vernal** (direction dans laquelle le Soleil est vu de la Terre au printemps). Elle permet ainsi de positionner les saisons par rapport à ce périhélie ou encore de calculer la distance de la Terre au Soleil pour une saison particulière. Ainsi actuellement, la Terre est la plus proche du Soleil au solstice d'hiver, c'est-à-dire pendant l'hiver boréal. Cette variable module donc l'amplitude de la variation saisonnière, adoucissant actuellement les hivers de l'hémisphère nord et y rafraichissant les étés.

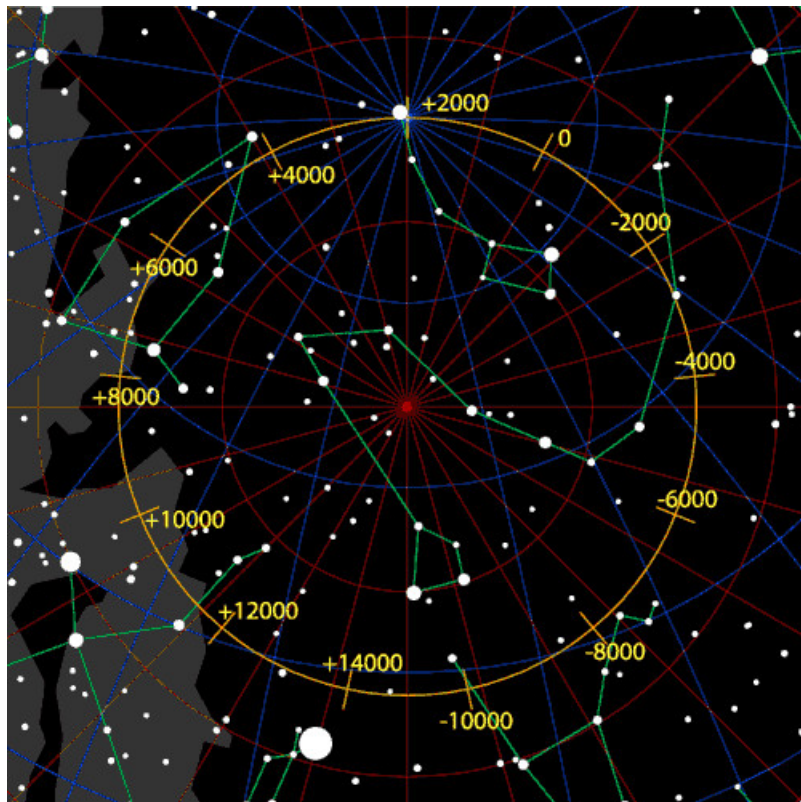


Figure 6. Précession astronomique. Parcours du Pôle Nord Céleste dans le ciel vu de la Terre. Cette vue est celle que l'on a de la Terre quand on regarde le ciel. Cela explique le mouvement du point vernal dans le sens anti-horlogique (sens inverse des aiguilles d'une montre), alors que vu d'en haut le mouvement est dans le sens horlogique. Le mouvement schématisé ici suppose une vitesse de précession et une obliquité constantes. [Source : Tau'olunga, CC BY-SA 2.5, via Wikimedia Commons]

La précession climatique varie avec une **période moyenne de 21 740 ans**, Cette période est due au fait que la position du printemps et celle du périhélie changent toutes deux par rapport aux étoiles fixes et ce, dans des directions opposées. Le mouvement absolu du point vernal est horlogique et celui du périhélie est antihorlogique avec période de ~135 200 ans. Le

mouvement relatif de l'un par rapport à l'autre obéit donc approximativement à l'équation suivante : $\frac{360}{21740} = \frac{360}{25760} + \frac{360}{135200}$.

Cette période moyenne résulte en fait des composantes fondamentales qui sont proches de 23 000 ans et de 19 000 ans et qui furent mises en évidence dans les années 1970 [2], corroborant ainsi les périodes trouvées par Hays *et al.* [3] dans les données géologiques.

Le nom de précession climatique a été introduit [2], car c'est la position relative du point vernal par rapport au périhélie qui importe en climatologie et non leur position absolue sur la voûte céleste.

La théorie qui lie les variations à longues périodes de ces paramètres à l'irradiance solaire d'une part et aux climats d'autre part s'appelle **la théorie astronomique des paléoclimats** [10],[11]. Il en existe plusieurs versions [12] que nous allons décrire dans le contexte de l'histoire de la découverte des variations du climat au cours des derniers siècles.

2. À la découverte des grandes variations du climat

2.1. Évolution des idées autour de l'évolution des climats depuis le 18^e siècle

Discipline descriptive, la **climatologie** est devenue une science multidisciplinaire faisant intervenir les **cinq composantes** du système climatique et leurs **interactions** mutuelles :

l'atmosphère,

l'hydrosphère,

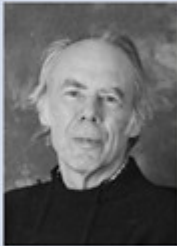
la cryosphère,

la lithosphère,

la biosphère.

Dès lors, il n'est pas surprenant que le climat qui en résulte varie aux échelles allant de la saison à des millions d'années. Bien que cette science ait littéralement explosé au cours des dernières décennies, la découverte et l'étude des premières traces de variations du climat dépassant l'échelle annuelle et décennale remontent au 18^e siècle. Une synthèse est donnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau. Quelques scientifiques impliqués dans l'évolution des idées autour de l'évolution des climats depuis le 18^e siècle [\[13\]](#).

Scientifiques			Idées pro
	Jens Esmark (1763-1839) Norvégien		propose les variations de comme causes des chang
	Joseph-Alphonse Adhémar (1797-1862) Français		tente d'expliquer la récur glaciaires à partir de la pr équinoxes
	James Croll (1821-1890) Eccossais		introduit les trois paramè et propose que l'hiver no fondamental dans la théo glaciaires
	Joseph Fourier (1786-1830) Français		Fourier découvre l'effet d Tyndall l'applique à l'air a Arrhenius propose les var comme cause des période
	John Tyndall (1820-1893) Irlandais		
		Svante Arrhenius (1859-1927) Suédois	
	Joseph John Murphy (1827-1894) Irlandais		introduit l'idée que les ét l'hémisphère nord sont à glaciaires
	Milutin Milankovitch (1879-1958) Serbo-croate		popularise la théorie astr un modèle de variation d éléments astronomiques Murphy où les étés frais important
	James D Hays (1926-)		améliorent de manière de techniques de reconstruc paléoclimats, Hays, Imbrie tous célèbres pour leur ar dans <i>Science</i> en 1976
	John Imbrie (1925-2016)		
	Nicholas Shackleton		
		Cesare Emiliani	

2.2. Une première étape : extension des glaciers et changements climatiques



Figure 7. Exemple de bloc erratique transporté de Savoie en région lyonnaise (St-Fons). [Source : Tusco, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons]

C'est au 18^e siècle que l'existence de blocs erratiques dans le paysage montagneux (Figure 7) fut associée pour la première fois à **l'extension spectaculaire des glaciers**. En 1744, le géographe grenoblois Pierre Martel [\[14\]](#) (1706-1767) rapporte, en effet, que les habitants de la vallée de Chamonix dans les Alpes de Savoie attribuaient la dispersion de ces roches moutonnées aux glaciers eux-mêmes dont l'extension aurait été beaucoup plus importante dans le passé. Cette idée était **révolutionnaire**, car jusqu'alors la plupart des scientifiques se référaient encore au mythe du Déluge de la Bible pour expliquer la structure des paysages. Ce fut le cas du genevois Horace Bénédict de Saussure (1740-1799), du paléontologue français George Cuvier (1769-1832) et du géologue écossais Charles Lyell (1797-1875) qui, tous, continuaient à supposer que ces blocs étaient charriés par la violence des eaux.

Toutefois, la localisation et la nature de ces blocs et autres moraines conduisirent quelques scientifiques à admettre que **le transport par la glace** expliquerait mieux les diverses observations. Le naturaliste écossais James Hutton (1726-1797) fut le premier à cautionner cette idée. D'autres suivirent et découvrirent dans les fluctuations de l'étendue des glaciers l'empreinte de changements climatiques : l'ingénieur suisse Ignace Venetz (1788-1859), l'ingénieur forestier allemand Albrecht Reinhardt Benhardi (1797-1849), le géologue suisse Jean de Charpentier (1786-1855) et le botaniste allemand Karl Friedrich Schimper (1803-1867), lequel introduisit la notion d'âge glaciaire. Mais c'est le géologue danois-norvégien Jens Esmark (1763-1839) qui, poursuivant son analyse du transport par les glaciers, proposa en 1824 et ce, très probablement pour la première fois, que les **changements climatiques** en seraient la cause et surtout que ceux-ci trouvaient leur origine dans les **variations de l'orbite terrestre**.

Ce sont les travaux de ces précurseurs qui conduisirent le géologue suisse Louis Agassiz (1801-1873) à formuler en 1837 son adresse à la Société Helvétique des Sciences Naturelles de Neuchâtel sur *Upon glaciers, moraines and erratic blocks*. Cette adresse fut toutefois critiquée, car il apparut qu'Agassiz avait "emprunté" sa conception de la théorie glaciaire à son ancien collègue universitaire Schimper et avait omis de reconnaître la contribution originale de Charpentier qui l'avait introduit à la recherche sur les glaciers.

2.3. Naissance de la théorie astronomique des paléoclimats

C'est aussi en ce début du 19^e siècle que le français Joseph Adhémar (1797-1862), non content d'étudier les calottes polaires, tenta d'expliquer dans son livre "Révolutions de la mer, déluges périodiques" [\[15\]](#) la **réurrence des âges glaciaires à partir de la précession des équinoxes**. La théorie astronomique des paléoclimats voyait le jour et allait pouvoir être poursuivie grâce au développement de la mécanique céleste avec les français Jean le Rond d'Alembert (1717-1783), Jean-Baptiste Joseph Delambre (1749-1822), Pierre Simon de Laplace (1749-1827), Louis Benjamin Francoeur (1773-1849) et Urbain Le Verrier (1811-1877). Parallèlement, une étape supplémentaire devait être franchie avec les premiers calculs des **variations à long terme de l'énergie reçue du Soleil**, variations dues à l'excentricité de l'orbite de la Terre, à la précession des équinoxes et à l'obliquité de l'écliptique. Ainsi s'illustrèrent John Frederick William Herschel (1792-1871), L.W. Meech (1821-1912) et Chr. Wiener (1826-1896) auxquels on peut associer les mathématiciens André-Marie Legendre (1751-1833) et Simon-Denis Poisson

(1781-1840).

Tout était dès lors prêt pour permettre à l'écossais James Croll (1821-1890) d'élaborer une **théorie des âges glaciaires** basée sur l'effet conjugué des **trois paramètres astronomiques**, théorie selon laquelle l'**hiver de l'hémisphère nord** devait jouer un rôle déterminant. Cette théorie fut fort appréciée par le naturaliste Charles Robert Darwin (1809-1882) et reprise par les frères géologues écossais Archibald (1835-1924) et James (1839-1914) Geikie qui introduisirent la notion d'**interglaciaire**. Elle est aussi à la base de la classification des glaciations alpines par Albrecht Penck (1858-1945) et Edouard Brückner (1862-1927) et des américaines par Thomas Chowder Chamberlin (1843-1928). Toutefois, les géologues allaient être de moins en moins satisfaits de la théorie de Croll et de nombreuses critiques virent le jour.

Beaucoup réfutèrent la théorie astronomique et lui préférèrent des explications liées à la seule planète Terre. Le géologue écossais Charles Lyell (1797-1875) insista sur la répartition géographique des terres et des mers pour expliquer l'alternance des climats chauds et froids, tandis que d'autres se tournèrent vers les variations de la concentration de certains gaz dans l'atmosphère

[16]. C'est ainsi que le physicien français Joseph Fourier (1786-1830) exposa l'idée originale de la **théorie de l'effet de serre** liée à la concentration en **dioxyde de carbone** dans l'air. Il allait être suivi par le chimiste irlandais John Tyndall (1820-1893) à qui l'on doit les premières expériences sur l'absorption du rayonnement infrarouge et l'hypothèse du rôle fondamental joué par la vapeur d'eau dans l'effet de serre. Plus tard, l'italien Luigi de Marchi (1857-1937) et le chimiste suédois Svante Arrhenius (1859-1927) proposèrent, avec d'autres scientifiques de leur époque, que les **périodes glaciaires** étaient dues à des baisses de la teneur atmosphérique en gaz carbonique. En 1895, Arrhenius suggéra dans un article publié à la *Société de Physique de Stockholm* que la réduction ou l'augmentation de 40% de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère pouvait engendrer des processus de **rétroaction** qui expliqueraient les avances et retraits glaciaires (Lire : [De la découverte de l'effet de serre au GIEC](#)).

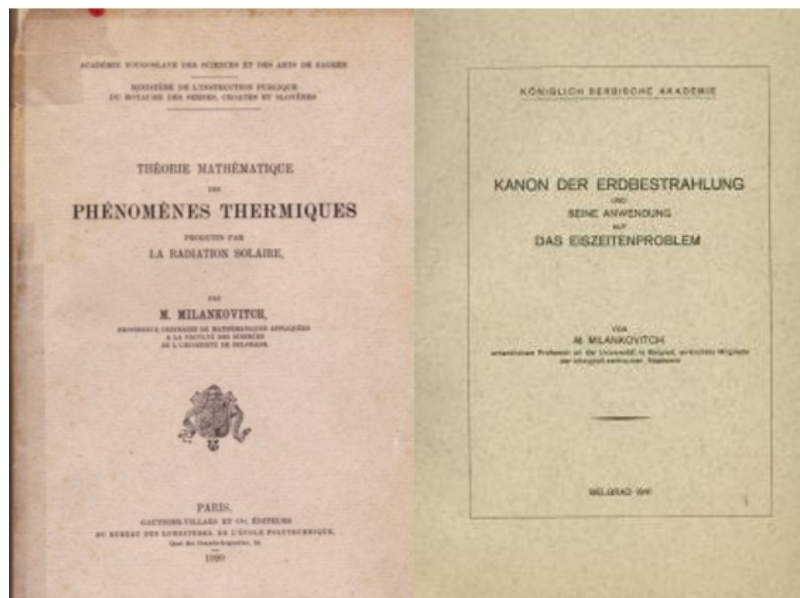


Figure 8. Couvertures des deux livres de Milankovitch. [Source : © Photo de André Berger]

Une renaissance de la théorie astronomique allait cependant être possible avec les améliorations apportées au calcul des éléments astronomiques par l'astronome américain John Nelson Stockwell (1832-1920) et en 1904 à celui de l'irradiation solaire par le mathématicien allemand Ludwig Pilgrim (1879-1935). C'est toutefois à Joseph John Murphy (1827-1894) que l'on doit d'avoir émis dès 1869 l'hypothèse fondamentale selon laquelle ce sont **les étés frais de l'hémisphère nord qui seraient à la base de l'existence des périodes glaciaires**. Cette idée originale fut reprise en 1921 par le climatologue autrichien Rudolf Spitaler (1859-1946), mais fut surtout popularisée par l'ingénieur-géophysicien serbe Milutin Milankovitch (1879-1958) (Figure 9), principalement au travers de ses livres "*Théorie mathématique des Phénomènes thermiques produits par la Radiation solaire*" [17] (1920) et "*Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf des Eizeitenproblem*" [51] (1941) (Figure 8).

Milankovitch est un contemporain du géophysicien-météorologiste Alfred Wegener (1880-1930) qu'il rencontra par l'intermédiaire du climatologue russo-germanique, Vladimir Köppen (1846-1940). Ce dernier avait entendu parler des travaux de Milankovitch et sa fille, Elsa Köppen, avait épousé Wegener. L'ère moderne de la théorie astronomique était née, même si l'**absence de données paléoclimatiques** et d'une **échelle de temps fiables** allait être à la base de nombreuses critiques issues à la fois du monde des géologues et de celui des météorologues.

Il a ainsi fallu attendre les années 1950 et 1960 pour que de nouvelles techniques permettent à la fois de dater, de mesurer et

d'interpréter les archives du climat contenues dans les sédiments marins, dans les glaces et sur les continents.

L'américain Cesare Emiliani [18] proposa en 1955 une stratigraphie, toujours en vigueur, basée sur la succession des minima et maxima du **rapport isotopique oxygène-18/oxygène-16** mesuré dans les coquilles des foraminifères retrouvées dans les sédiments de l'océan profond. L'interprétation de ce rapport isotopique allait suivre en termes de salinité avec Jean-Claude Duplessy [19] et en termes de température et de volume de glace avec Nicholas Shackleton et Niels Opdyke [20].

Les outils mathématiques permirent alors de créer des fonctions de transfert pour interpréter quantitativement les informations recueillies dans les océans ou grâce aux cernes d'arbres. L'effort déployé par le groupe CLIMAP [21] (1976) déboucha sur la **première carte climatique saisonnière du Dernier Maximum Glaciaire** et sur l'article déterminant de 1976 par James Hays, John Imbrie (1925-2016) et Nicholas Shackleton (1937-2006). L'avènement des grands ordinateurs autorisa les premières simulations climatiques à partir de modèles de circulation générale [22] et la poursuite des calculs astronomiques conduisit à une échelle temporelle de référence de grande précision ainsi qu'à la détermination de l'irradiation journalière et saisonnière indispensable à la modélisation du climat [23].

3. Théorie astronomique de Milankovitch et après

3.1. Milankovitch et les cycles de glaciation

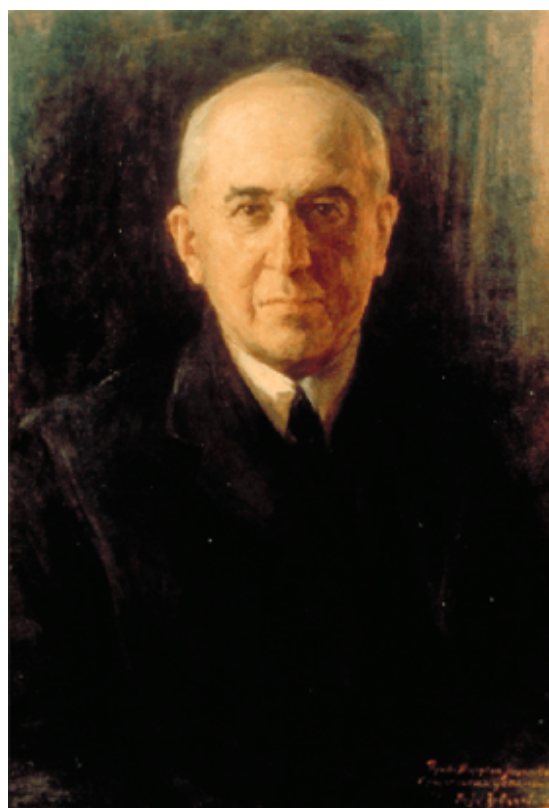


Figure 9. Portrait de Milutin Milankovitch à l'Académie Serbe des Sciences et des Arts à Belgrade, peint par Paja Jovanovic en 1943
[Source : frwiki, (CC BY-SA 3.0), <https://fracademic.com/dic.nsf/frwiki/1167469>]

Milutin Milankovitch (Figure 9) est né en 1879 à Dalj (en Austro-Hongrie à cette époque, actuellement en Croatie) et est décédé à Belgrade en 1958. Il obtint son diplôme d'Ingénieur civil à l'Université de Vienne en 1902 et son doctorat en sciences en 1904. Il commença alors une carrière d'ingénieur en constructions où il bénéficia d'une grande renommée pour ses barrages, ponts et autres halls industriels. Il fut nommé professeur à l'Université de Belgrade en 1909 et il y enseigna la mécanique céleste et la physique théorique pendant 46 ans. En 1912, il décida de se consacrer à l'étude mathématique du climat. Si, comme exposé plus tôt, Milankovitch n'est pas le premier à avoir émis une **théorie astronomique** expliquant la récurrence des âges glaciaires, il contribua toutefois à la **populariser** de manière magistrale. Il se consacra d'abord à la recherche des meilleures valeurs disponibles à cette époque pour calculer les variations à long terme de **l'excentricité**, de **l'obliquité** et de la **précession climatique**. C'est ainsi que dans son livre de 1920, il utilisa les valeurs de Stockwell de 1873 et de Pilgrim de 1904. Dans son livre de 1941, il décida avec son collègue l'astronome serbe Miskovitch (1892-1976) d'utiliser les valeurs de Leverrier de 1855, mais après les avoir corrigées pour tenir compte des meilleures valeurs des masses des planètes devenues disponibles entretemps.

Sa courbe d'insolation pour l'été boréal à 65°N, basée sur l'idée de Murphy et calculée à partir des travaux de Leverrier et

Milankovitch, est demeurée célèbre (Figure 10), car elle a permis aux géologues, Brückner, Köppen et Wegener (1925) en particulier, d'interpréter les **cycles glaciaires-interglaciaires** tels qu'ils les connaissaient à cette époque.

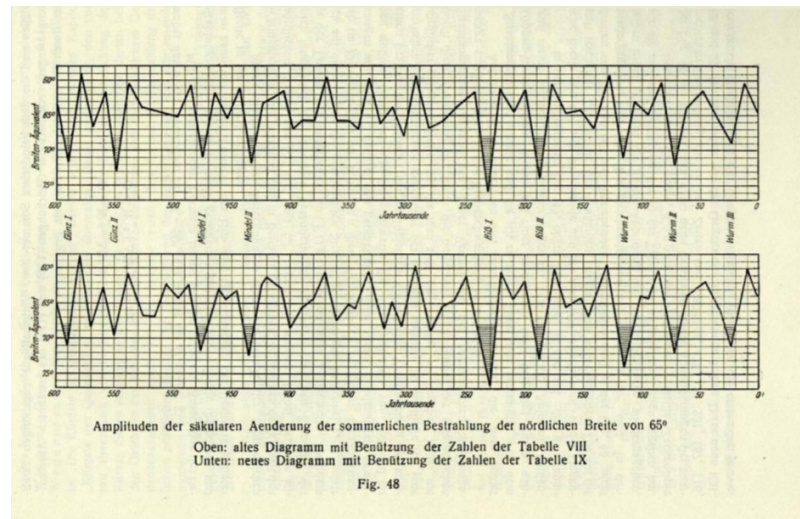


Figure 10. Variations à long terme de la latitude équivalente à 65°N au cours des 600.000 dernières années commençant en 1800 AD comme dans Le Verrier. [Source : Extrait de l'ouvrage de Milankovitch5]

Sur cette Figure 10, la courbe du haut est basée sur l'insolation calorique d'été calculée à partir des valeurs astronomiques de Stockwell et Pilgrim, alors que la courbe du bas est basée sur l'insolation calorique d'été calculée à partir des valeurs astronomiques de Le Verrier et Miskovic. Les deux figures donnent la latitude actuelle, appelée latitude équivalente, qui reçoit la même quantité d'énergie pendant l'**été calorique** de l'hémisphère nord que la latitude 65°N pendant la même saison dans le passé. Par exemple, il y a 22 000 ans, la latitude 65°N recevait 426 unités caloriques de moins qu'actuellement, c'est-à-dire 13 455 unités caloriques moins 426 ce qui donne 13 029 unités caloriques, à peu de chose près ce que reçoit la latitude 70°N actuellement (13 074). **L'unité calorique est une grandeur introduite par Milankovitch telle que la constante solaire y sert d'unité de rayonnement et que l'unité de temps y est la 100 000^e partie de l'année.** L'été calorique est exactement une demi-année comprenant tous les jours qui reçoivent le plus grand rayonnement. Autrement dit, n'importe quel jour de l'été calorique d'un hémisphère reçoit une énergie plus grande que n'importe quel jour de l'hiver calorique du même hémisphère.

Milankovitch ne semble pas avoir été intéressé par les périodes qui caractérisent les variations à long terme de ces paramètres astronomiques et note simplement, comme le fera Emiliani (1922-1995) en 1955 [\[12\]](#),[\[19\]](#), que les distances moyennes entre les maxima successifs de ses courbes sont pour l'excentricité 92 000 ans, pour l'obliquité 40 000 ans et pour la précession 21 000 ans. Il ne s'intéressa pas non plus à leurs développements analytiques. En fait, c'est seulement à la fin de la vie de Milankovitch qu'apparurent les premières solutions permettant un calcul plus précis des éléments astronomiques.

3.2. Calcul plus précis des éléments astronomiques

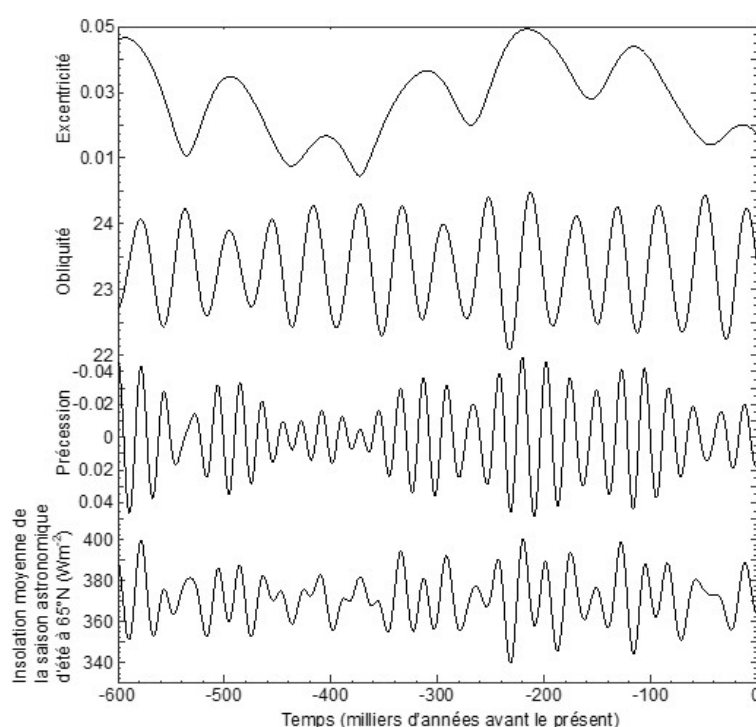


Figure 11. Variations à long terme sur les derniers 600 000 ans de l'excentricité, de la précession climatique, de l'obliquité et de l'insolation moyenne reçue à 65°N pendant la saison astronomique d'une demi-année de l'été de l'Hémisphère nord. [Source : Figure dessinée par les auteurs à partir des références 29 et 30]

Ce furent d'abord celles des astronomes américains d'origine néerlandaise Dirk Brouwer (1902-1966) et A.J. Jos van Woerkom (1915-1991) en 1950, des astronomes géophysiciens russes S.G. Sharaf et N.A. Budnikova en 1967 et de l'astronome français Pierre Bretagnon [24] (1942-2002) en 1974.

C'est alors qu'André Berger publia les **séries trigonométriques** qui fournissent directement le spectre des variations à long terme de l'excentricité, de l'obliquité et de la précession, et permettent un calcul simple, mais précis, des valeurs numériques de ces paramètres sur les derniers millions d'années [25],[2]. Les **données géologiques** devenant de plus en plus fiables au cours des derniers millions et dizaines de millions d'années ont permis de calibrer les solutions de Jacques Laskar [26] qui fut le premier à calculer les valeurs des trois paramètres astronomiques sur de très longues périodes de temps et avec une telle précision [27]. Des études de la sensibilité des périodes astronomiques aux variations de la vitesse de rotation de la Terre, de la distance Terre-Lune et de l'ellipticité dynamique de la Terre ont finalement montré une diminution progressive de ces périodes sur plusieurs centaines de millions d'années [28].

La qualité du calcul des paramètres de l'orbite de la Terre et de sa rotation atteinte au cours des dernières décennies permet de reproduire les **variations à long terme** de l'excentricité, de l'obliquité et de la précession climatique avec une **excellente précision**. Ces paramètres [29] peuvent alors être utilisés pour calculer l'énergie solaire arrivant sur la Terre, par exemple pendant la saison astronomique d'une demi-année de l'été de l'hémisphère nord à 65°N [30]. Les variations sont données dans la figure 11 pour les 600 000 dernières années afin de pouvoir les comparer aux variations similaires décrites par Milankovitch (Figure 10). Cette comparaison permet d'apprécier la qualité de la courbe de Milankovitch obtenue il y a une centaine d'années et représentant cette même énergie disponible en été à 65°N. Mais elle met aussi en évidence l'amélioration de l'échelle de temps et montre une structure plus fine des variations.

Comme déjà mentionné plus haut, c'est l'Irlandais Joseph John Murphy qui fut le premier en 1869 à proposer qu'un **été long et frais et un hiver court et doux** seraient les conditions les plus favorables pour entrer en **glaciation**. Milankovitch en a popularisé et propagé l'idée en considérant l'insolation à 65°N. Cette idée de considérer les hautes latitudes boréales est issue de ses travaux sur l'influence des champs de neige, de la glace et des calottes glaciaires sur le climat. C'est dans ces latitudes polaires de l'hémisphère nord que l'on trouve de vastes étendues continentales permettant l'installation d'immenses inlandsis avec des rétroactions positives importantes permettant une intensification significative déterminante du forçage d'insolation. La figure 11 suggère que les variations périodiques des paramètres astronomiques sont à l'origine des **variations cycliques du climat dans le passé** (théorie astronomique du climat). En particulier la cyclicité de l'ordre de 100 000 ans des âges glaciaires des dernières centaines de milliers d'années [4] est corrélée à l'excentricité.

4. Messages à retenir

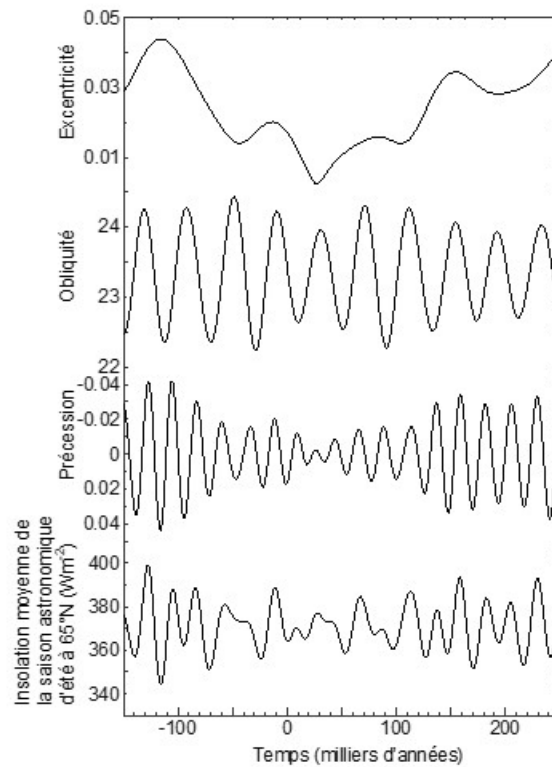


Figure 12. Variations des paramètres astronomiques entre 150 000 ans dans le passé et 250 000 ans dans le futur. [Figure dessinée par les auteurs à partir des références 29 et 30]

La **théorie astronomique des paléoclimats** et ses diverses versions ont incontestablement aidé à comprendre les variations climatiques des derniers millions d'années et, en particulier la récurrence des cycles glaciaires-interglaciaires du Quaternaire [31].

Les paramètres du **mouvement de la Terre autour du Soleil**(excentricité de sa trajectoire elliptique, obliquité et précession de son axe de rotation) sont les responsables des **variations climatiques naturelles** au cours des derniers millions d'années.

Cette aventure a commencé il y a plus de trois siècles. Cela a permis de progressivement préciser le cadre dans lequel le climat actuel varie et ainsi de mieux cerner **l'impact possible des activités humaines sur le climat** des prochains millénaires [32]. La figure 12 reproduit les variations des paramètres astronomiques entre 150 000 ans dans le passé et 250 000 ans dans le futur. On notera qu'au cours des 50 000 prochaines années, l'obliquité, mais surtout l'excentricité diminue, l'orbite de la Terre devenant circulaire dans environ 27 000 ans. Cela a une incidence directe sur la précession climatique qui varie très peu au cours des dizaines de milliers d'années à venir. Cette **stabilité** se marque de façon visible sur l'évolution de l'insolation avec un impact possible sur le climat, car les autres forçages, tels les **gaz à effet de serre**, pourraient alors exercer une **influence plus importante** sur le climat.

Notes et références

- [1] Joussaume S., 1993. Climat d'hier à demain. CNRS éditions/CEA, Paris
- [2] Berger A., 1978. Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes. *J. Atmos. Sci.*, 35(12),2362-2367.
- [4] Hays J.D., Imbrie J. & Shackleton N.J., 1976. Variations in the earth's orbit: pacemaker of the ice ages. *Science* 194: 1121–1132. <http://www.jstor.org/stable/1743620?origin=JSTOR-pdf>
- [5] Milankovitch M., 1941. Kanon der Erdbastrahlung und seine Anwendung auf des Eiszeitenproblem. Special Publication 132,

Section of Mathematical and Natural Sciences, Vol. 33, p. 633. Belgrad, Royal Serbian Academy of Sciences. ('Canon of Insolation and the Ice-Age Problem', translated from German by the Israel Program for Scientific Translations and published for the U.S. Department of Commerce and the National Science Foundation, Washington DC, 1969. Reprinted by Zavod za udzbenike i nastavna sredstva in cooperation with Muzej nauke i tehnike Srpske akademije nauka i umetnosti, Beograd, 1998).

[6] Johannes Kepler (1571-1630), astronome. <https://www.astrofiles.net/astronomie-johannes-kepler>

[7] Périhélie et aphélie sont les endroits de l'orbite de la Terre autour du Soleil où la distance Terre-Soleil est respectivement la plus courte et la plus longue. Si r_p est la distance au périhélie et r_a à l'aphélie, l'équation de l'ellipse donne $r_p = a(1-e)$, $r_a = a(1+e)$ et $r_a - r_p = 2ae$.

[8] L'irradiance s'exprime en Watt par m^2 , c'est la quantité d'énergie, en Joules, qui passe par unité de temps, la seconde, perpendiculairement à travers une unité de surface, un m^2 et ce, à la distance moyenne Terre-Soleil.

[9] Le mot insolation est une abréviation de l'expression anglaise *incoming solar radiation* (rayonnement solaire entrant).

[10] Imbrie, J., Imbrie, K. P., 1979. Ice Ages, Solving the Mystery. Enslow Publishers, New Jersey.

[11] Berger, A. 1988. Milankovitch theory and climate. *Reviews of Geophysics* 26(4): 624–657.

[12] Berger, A., 2012. A brief history of the astronomical theories of paleoclimates. In: "Climate change at the eve of the second decade of the century. Inferences from paleoclimates and regional aspects". Proceedings of Milankovitch 130th Anniversary Symposium, A. Berger, F. Mesinger, D. Sijacki (eds). 107-129. Springer-Verlag/Wien. DOI 10.1007/978-3-7091-0973-1.

[13] Les sources des gravures ou photos du tableau sont les suivantes : Jens Esmark (gravure Louis Fehr / Public domain, via Wikipedia Commons) ; James Croll (photo Luis Alberto 9919 / CC BY 3.0, via Wikipedia Commons) ; Joseph Fourier (gravure Amédée Félix Barthélemy Geille / Public domain, via Wikipedia Commons) ; John Tyndall (Woodburytype by Lock and Whitfield, no copyright, United States, CC0, via The Smithsonian Libraries) ; Svante Arrhenius (Photogravure Meisenbach Riffarth & Co. Leipzig. / Public domain, via Wikimedia Commons) ; Joseph John Murphy (Photo reproduite de Complex adaptations, University of Utah) ; Milutin Milankovitch (Portrait à l'Académie Serbe des Sciences et des Arts à Belgrade, peint par Paja Jovanovic en 1943 [source frwiki / CC BY-SA 3.0]) ; James D Hays (Columbia University) ; John Imbrie (Columbia University) ; Nicholas Shackleton (source frwiki / CC-BY-SA) ; Cesare Emiliani (Universal Holocene Calendar, Facebook) ; André Berger (photo André Berger) ; Jacques Laskar (photo <https://perso.imcce.fr/jacques-laskar/en/>)

[14] Les références aux textes anciens sont données dans Berger (référence [12]).

[15] Adhémar, J. A., 1842. Révolution des mers, Déluges périodiques. Première édition: Carilian-Goeury et V. Dalmont, Paris. Seconde édition: Lacroix-Comon, Hachette et Cie, Dalmont et Dunod, Paris, 359 p.

[16] Bard, E., 2004. Greenhouse effect and ice ages: historical perspective. *C. R. Geoscience*, 336, 603-638.

[17] Milankovitch, M., 1920. Théorie Mathématique des Phénomènes Thermiques Produits par la Radiation Solaire. *Académie Yougoslave des Sciences et des Arts de Zagreb* (Gauthier Villars, Paris).

[18] Emiliani, C. R. W., 1955. Pleistocene temperatures. *Journal of Geology* 63(6): 538–578.

[19] Duplessy, J. C., 1970. Note préliminaire sur les variations de la composition isotopique de l'Océan Indien à la relation O^{18} -salinité. *C. R. Académie des Sciences de Paris*, 271 série D, 1075-1078.

[20] Shackleton, N. J. and Opdyke, N. D., 1973. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28–238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 105 and 106 year scale. *Quaternary Research* 3: 39–55.

[21] CLIMAP Project Members. 1976. The surface of the Ice-Age Earth. *Science* 191: 1131–1136.

[22] Alyea, F.N, 1972. Numerical simulation of an ice-age paleoclimate. *Atmosphere Science Papers* 193, Colorado State University, Fort Collins, USA.

[23] Berger A., 1973. Théorie astronomique des paléoclimats. Dissertation doctorale, Université catholique de Louvain, Faculté des Sciences, 2 volumes.

[24] Bretagnon, P., 1974. Termes à longues périodes dans le système solaire. *Astronomy and Astrophysics* 30: 141–154.

[25] Berger, A., 1976. Obliquity and general precession for the last 5 000 000 years. *Astronomy and Astrophysics*, 51, pp.

[26] Laskar J., 1986, Secular terms of classical planetary theories using the results of general theory, *Astronomy and Astrophysics*, 157, 59-70.

[27] Laskar J., Fienga A., Gastineau M. & Manche H., 2011. La2010 : a new orbital solution for the long-term motion of the Earth. *Astronomy and Astrophysics*, 532, A89, 1-15. 0. EDP Sciences, 1051/0004-6361/201116836

[28] Berger A., Loutre M.F. & Laskar J., 1992. Stability of the astronomical frequencies over the Earth's history for paleoclimate studies. *Science*, 255, pp. 560-566.

[29] Berger A. et Loutre M.F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 10 n°4, pp. 297-317.

[30] Berger A., Loutre M.F. and YIN Q.Z., 2010. Total irradiation during the interval of the year using elliptical integrals. *Quaternary Science Reviews*, 29, pp. 1968-1982. doi:10.1016/j.quascirev.2010.05.007

[31] Yin Q.Z. & A. Berger, 2012. Individual contribution of insolation and CO₂ to the diversity of the interglacial climates of the past 800,000 years. *Climate Dynamics*, 38, 709-724. DOI 10.1007/s00382-011-1013-5

[32] Berger A. & M.F. Loutre, 2002. An Exceptionally long Interglacial Ahead ? *Science*, 297, pp. 1287-1288

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteurs** : BERGER André - YIN Qiuzhen (2021), Les théories astronomiques du climat : une longue histoire, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=12726>

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.
