

PALÉOCLIMATOLOGIE

TROUVER, DATER ET INTERPRÉTER
LES INDICES – TOME I



JEAN-CLAUDE DUPLESSY
ET GILLES RAMSTEIN

Jean-Claude Duplessy et Gilles Ramstein

Paléoclimatologie
Enquête sur les climats anciens

Tome 1

Trouver, dater et interpréter les indices

S A V O I R S A C T U E L S

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

Illustration de couverture : Icebergs relâchés depuis la côte Antarctique au large de la station française de Dumont d'Urville. Cliché d'Irène Lefèvre (LSCE) pris pendant la campagne océanographique CADO du N/O Marion Dufresne.

Imprimé en France.

© 2013, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A
et
CNRS ÉDITIONS, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN EDP Sciences 978-2-7598-0740-6

ISBN CNRS ÉDITIONS 978-2-271-07598-7

Biographie

André Berger est Professeur Émérite à l'université catholique de Louvain, à Louvain-la-Neuve, Belgique. Il est maître en sciences météorologiques du MIT (Massachusetts Institute of Technology, USA) et docteur en sciences de l'université catholique de Louvain, où il a enseigné la météorologie et la climatologie. Il est Docteur *honoris causa* des universités de Aix-Marseille III, Paul Sabatier de Toulouse et de la faculté Polytechnique de Mons. Il est membre de l'Academia europaea, de la Royal Astronomical Society et des Académies des Sciences de Paris, des Pays-Bas, de Serbie, du Canada et de Belgique. Il fut membre du comité d'orientation scientifique et stratégique du Collège de France, du conseil scientifique de l'Agence européenne de l'environnement et du Conseil de l'environnement de Électricité de France, et est membre du comité scientifique consultatif auprès de Météo-France depuis 2001. Il est titulaire du prix Lemaître, du prix Quinquennal du Fonds national belge de la recherche scientifique et du prix Latsis de la Fondation européenne de la science. Il est président honoraire de l'Union européenne de géosciences.

André Berger est un pionnier reconnu de l'étude des variations du climat à l'échelle astronomique. Son calcul des variations à long terme des éléments astronomiques a permis d'établir une échelle chronologique de haute précision sur le dernier million d'années, indispensable à l'interprétation des données paléoclimatiques. Il y a démontré l'existence des nouvelles périodicités de 19 000, 23 000, 54 000 et 400 0000 ans et, avec son équipe, a construit le premier modèle de complexité intermédiaire permettant le calcul des variations du climat sur des périodes de centaines de milliers d'années. Il est l'auteur du *Climat de la Terre, un passé pour quel avenir*, a édité dix livres sur les climats anciens et a écrit plus de deux cents articles sur les variations du climat passé, présent et à venir.

André Berger a été anobli par le Roi des Belges au titre de Chevalier et est Officier de la Légion d'Honneur en France.

Vj ku'r ci g'kpvgpvkqpcm{ 'ighv'dncpm

Préface

Une brève histoire des paléoclimats

Le climat est incontestablement un sujet d'actualité. Il jouit d'un intérêt certain depuis quelques décennies, décennies au cours desquelles l'étude des climats anciens (la paléoclimatologie) a acquis ses lettres de noblesse. Actuellement, elle est devenue indispensable pour appréhender le fonctionnement du système climatique et valider les modèles qui servent à établir des projections pour le futur. Grâce à l'étude des climats du passé, une banque de données, qui comporte une diversité de changements climatiques bien supérieure à celle qui caractérise les derniers siècles, a pu être créée. Cette diversité permet de tester les modèles climatiques dans des situations largement différentes de celles que nous avons connues au cours des 150 dernières années et, pour certains climats, plus proches de celles qui nous attendent dans le futur si on s'en réfère aux conclusions du Groupe intergouvernemental pour l'étude du climat.

Le climat de la Terre change, n'a cessé de changer au cours des temps et continuera de le faire dans l'avenir. Si tous nous sommes conscients de l'existence des phénomènes météorologiques qui conditionnent notre vie jour après jour, peu d'entre nous sont informés de ce qu'est en réalité le climat. C'est la grande variabilité du « temps » météorologique dans l'espace et au cours de l'histoire qui est à l'origine de cette science. Ce mot vient du grec *klima* qui signifie inclinaison, celle des rayons du Soleil en l'occurrence. C'est donc dès l'aube de notre civilisation que variations du climat et de l'énergie qui nous vient du Soleil furent associées dans une relation de cause à effet. Ce terme climat a très longtemps été réservé à la description des caractéristiques de la température de l'air et des précipitations propres à différents endroits du globe. Cette description était basée sur les mesures météorologiques et leur moyenne effectuées au cours des quelques décennies. Ce n'est que récemment qu'on a compris que le climat variait aussi sur des échelles de temps beaucoup plus longues et concernait dès lors plus que la seule atmosphère. À l'heure actuelle, les spécialistes qui étudient le climat et ses variations analysent l'ensemble des enveloppes fluides et solides de la Terre. À l'atmosphère, on associe l'hydrosphère et la cryosphère qui regroupent les systèmes où l'eau existe sous

forme solide (champs de neige, glaciers et inlandsis) et liquide (rivières, lacs et mers), la biosphère des continents où tectonique des plaques et activité volcanique se manifestent, et finalement la surface, ensemble du monde vivant qui influencent la nature et les propriétés de la couverture du sol et les cycles biogéochimiques.

D'une discipline descriptive, la climatologie est devenue une science multidisciplinaire faisant intervenir cinq systèmes complexes et leurs interactions mutuelles. Il n'est dès lors pas surprenant que le climat qui en résulte varie aux échelles allant de la saison à des millions d'années. Bien que ce soit au cours des dernières décennies seulement que cette science ait littéralement explosé, la découverte et l'étude des premières traces de variations du climat dépassant l'échelle annuelle et décennale remontent au XVIII^e siècle. C'est à cette époque que l'existence de blocs erratiques dans le paysage montagneux fut associée pour la première fois à l'extension spectaculaire des glaciers. En 1744, le géographe grenoblois Pierre Martel (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 Bénédicte de Chaussure (1740-1799), du paléontologue français Georges Cuvier (1769-1832) et du géologue écossais Charles Lyell (1797-1875), qui 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 verront dans les fluctuations de l'étendue des glaciers l'empreinte de changements climatiques. Ce sont l'ingénieur suisse Ignace Venetz (1788-1859), l'ingénieur forestier allemand Albrecht Reinhart Benhardi (1797-1849), le géologue suisse Jean de Charpentier (1786-1855) et le botaniste allemand Karl Fredrich 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, 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 Neufchatel sur « Upon glaciers, moraines and erratic blocks ». C'est aussi en ce début du XIX^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* (1842) la récurrence 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 aux éléments astronomiques que sont l'excentricité de l'orbite de la Terre, la précession des équinoxes et l'obliquité de l'écliptique. Ainsi, s'illustreront John Frederick William Herschel (1792-1871), L.W. Meech (1855) et Chr. Wiener (1876), et ce, aussi grâce aux travaux des 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. C'est ainsi que le physicien français Joseph Fourier (1786-1830) exposa l'idée originale de la théorie de l'effet de serre. 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 causées par 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.

Une renaissance de la théorie astronomique allait cependant être possible avec les améliorations apportées au calcul des éléments astronomiques par John Nelson Stockwell (1822-1920) et à celui de l'irradiation solaire (1904) par le mathématicien allemand Ludwig Pilgrim. C'est toutefois à Joseph John

Murphy que l'on doit d'avoir émis, dès 1869, l'hypothèse fondamentale selon laquelle ce sont les étés frais de l'hémisphère nord qui sont à la base de l'existence des périodes glaciaires. Cette idée originale fut reprise par Rudolf Spitaler en 1921, mais fut surtout popularisée par l'ingénieur-géophysicien serbe Milutin Milankovitch (1879-1958), principalement au travers de ses livres *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire* (1920) et *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf des Eizeitenproblem* (1941). L'ère moderne de la théorie astronomique était née, même si l'absence de données paléoclimatiques et d'une échelle de temps fiables allaient 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, les glaces et sur les continents. L'Américain Cesare Emiliani 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 (1970), et en termes de température et de volume de glace avec Nicholas Shackleton et Niels Opdyke (1973). Les outils mathématiques permirent alors de créer des fonctions de transfert pour interpréter quantitativement les informations recueillies dans les océans (John Imbrie et Nilva Kipp, 1974) ou grâce aux cernes d'arbres (Harold Fritts, 1968). L'effort déployé par le groupe CLIMAP (1976) déboucha sur la première carte climatique saisonnière du Dernier Maximum glaciaire et sur l'article déterminant de James Hays, John Imbrie et Nicholas Shackleton (1976). L'avènement des grands ordinateurs autorisa les premières simulations climatiques à partir de modèles de circulation générale (Fred Nelson Alyea, 1972) 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 (André Berger, 1973).

Cette évolution et le développement récent de la paléoclimatologie montrent toute la difficulté d'aborder l'étude du système climatique. Cette difficulté requiert l'existence de livres de qualité pour aider à comprendre et à mettre à jour les disciplines en jeu. C'est dans cette optique que s'inscrit le présent ouvrage. Écrit en français, il comble incontestablement une lacune dans le domaine de l'enseignement universitaire gradué et post-gradué en dépassant largement le niveau de la description. Il fait, en effet, le point des connaissances sur un certain nombre de sujets clefs en fournissant l'information nécessaire pour comprendre et apprécier la complexité des disciplines abordées, ce qui en fait un livre de référence en la matière. Un des deux volumes est consacré aux méthodes de reconstitution des climats anciens, l'autre au comportement du système climatique dans le passé. Les trente chapitres sont souvent écrits par des chercheurs du Laboratoire des Sciences du Climat

et de l'Environnement et apparentés, chacun dans son domaine d'expertise, ce qui permet un texte sûr où l'expérience transpire.

Comprendre l'évolution du climat de la Terre et ses multiples variations n'est pas seulement un défi académique. C'est aussi fondamental pour pouvoir mieux cerner le climat futur et ses incidences possibles sur la société de demain. Jean-Claude Duplessy et Gilles Ramstein ont réussi ce tour de force de rassembler une cinquantaine de chercheurs parmi les plus connus. Le livre qu'ils ont écrit est une somme livrant à la fois les bases nécessaires sur les techniques de reconstructions des climats anciens, sur leur cadre chronologique et sur le fonctionnement du système climatique du passé à partir d'observations et modèles. Ce livre permettra à tous ceux qui veulent en savoir plus de pénétrer une science, certes difficile, mais combien enthousiasmante. Il leur donnera aussi l'information indispensable pour se faire une idée objective du climat et de ses variations passées et futures.

André BERGER,

Professeur Émérite à l'Université catholique de Louvain, Louvain la Neuve

Vj ku'r ci g'kpvgpvkqpcm{ 'ighv'dn̩pm

Table des matières

| | |
|--|--------------|
| Biographie | iii |
| Préface | v |
| Avant-propos | xix |
| Introduction | xxiii |
| 1 Le système climatique : son fonctionnement et son histoire | 1 |
| 1.1 L'évolution du climat | 2 |
| 1.1.1 Définition du climat | 2 |
| 1.1.2 L'évolution passée du climat | 2 |
| 1.2 Les mécanismes du climat | 4 |
| 1.2.1 Le bilan radiatif de la Terre | 4 |
| 1.2.1.1 L'effet de serre | 4 |
| 1.2.1.2 Le cycle de l'eau | 6 |
| 1.2.2 Les variations associées au Soleil | 7 |
| 1.2.2.1 Les cycles solaires | 7 |
| 1.2.2.2 Les variations lentes du mouvement de la Terre autour du Soleil | 9 |
| 1.2.2.3 L'évolution du Soleil | 11 |
| 1.2.3 Reconstruire l'histoire de la composition de l'atmosphère | 11 |
| 1.3 L'atmosphère | 15 |
| 1.3.1 Les grandes caractéristiques de la circulation atmosphérique | 15 |
| 1.3.2 Vapeur d'eau, nuages et précipitations | 17 |
| 1.3.3 Reconstruire les variations des précipitations | 18 |
| 1.3.4 Les modes de variabilité de l'atmosphère | 19 |
| 1.4 Les océans | 23 |
| 1.4.1 Les grandes caractéristiques des océans | 23 |
| 1.4.2 La circulation océanique | 24 |
| 1.4.3 Reconstruire la circulation océanique dans le passé | 25 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1.4.4 | El Niño, du jeu des interactions entre l'atmosphère et les océans | 26 |
| 1.5 | La biosphère terrestre et marine | 28 |
| 1.5.1 | La distribution géographique de la biosphère | 28 |
| 1.5.2 | Le rôle de la biosphère | 29 |
| 1.5.3 | Biosphère passée et paléoclimats | 30 |
| 1.6 | La cryosphère | 31 |
| 1.6.1 | Le rôle de la cryosphère | 32 |
| 1.6.2 | Cryosphère passée et paléoclimats | 33 |
| 1.7 | La lithosphère : les grandes échelles de temps | 35 |
| 1.8 | Le système climatique | 36 |
| 2 | Introduction à la géochronologie | 41 |
| 3 | Le carbone-14 | 45 |
| 3.1 | Principe de la méthode radiocarbone | 46 |
| 3.1.1 | La découverte de la méthode | 46 |
| 3.1.2 | Établissement du principe de la méthode de datation | 48 |
| 3.1.3 | Estimation de la période et premières datations | 50 |
| 3.1.4 | Principe de la méthode | 50 |
| 3.1.5 | Validité des hypothèses et définition d'un standard de référence d'atmosphère | 51 |
| 3.2 | Calibration des âges ^{14}C | 56 |
| 3.2.1 | Méthodes et résultats | 56 |
| 3.2.2 | Exemples de l'apport d'une calibration précise des âges carbone-14 | 59 |
| 3.2.2.1 | La datation de l'éruption de Santorin | 59 |
| 3.2.2.2 | Le schéma de bascule du transfert nord-sud de chaleur | 60 |
| 3.2.3 | Les âges apparents | 61 |
| 3.2.3.1 | Milieux océaniques : les âges de ventilation et les âges réservoirs | 61 |
| 3.2.3.2 | Milieux continentaux : les effets d'eau dure et le carbone mort | 64 |
| 3.3 | Le carbone-14 traceur des échanges entre les différents réservoirs de carbone | 66 |
| 3.3.1 | Exemples de simulation de la circulation océanique moderne | 67 |
| 3.3.2 | Paléocirculation océanique | 69 |
| 3.3.3 | Minéralisation de la matière organique des sols | 70 |
| 3.4 | Traitements des échantillons et calculs d'âge carbone-14 | 73 |
| 3.4.1 | Traitements physico-chimique | 74 |
| 3.4.2 | Détermination d'un âge carbone-14 | 74 |
| 3.5 | Quelques exemples de perturbations post-dépôts des âges carbone-14 | 75 |

| | |
|---|------------|
| 4 Méthodes $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | 83 |
| 4.1 Principes de la méthode K-Ar | 85 |
| 4.1.1 Schéma de désintégration radioactive du ^{40}K | 85 |
| 4.1.2 L'équation d'âge | 85 |
| 4.1.3 Fonctionnement de l'horloge potassium-argon | 87 |
| 4.1.4 Matériaux datables et gamme d'âges | 89 |
| 4.2 La méthode de datation K-Ar sans traceur | 90 |
| 4.2.1 Sélection et préparation des échantillons | 90 |
| 4.2.2 La détermination de $^{40}\text{Ar}^*$ | 90 |
| 4.2.3 Exemple de calcul d'âge | 95 |
| 4.3 La méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$: principes généraux | 97 |
| 4.3.1 L'équation d'âge | 97 |
| 4.3.2 Les corrections d'argon atmosphérique et d'interférence de masse | 99 |
| 4.3.3 Les spectres d'âges | 101 |
| 4.3.4 La méthode au grain par grain | 102 |
| 4.3.5 Les isochrones | 102 |
| 4.3.6 Sélection et préparation des échantillons | 104 |
| 4.3.7 Analyse spectrométrique | 105 |
| 4.3.8 Calcul d'âge | 105 |
| 4.4 Avantages et inconvénients des méthodes $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | 107 |
| 4.4.1 Application : exemple de la datation de l'événement de Laschamp | 107 |
| 5 Datation des coraux et autres échantillons géologiques par le déséquilibre entre les isotopes de l'uranium et du thorium | 113 |
| 5.1 Méthodologie de la datation $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ | 115 |
| 5.1.1 Principe de la datation $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ | 115 |
| 5.1.2 Sélection d'un corail en vue de la datation $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ | 118 |
| 5.1.3 Procédure chimique | 119 |
| 5.1.4 Mesure physique par spectrométrie de masse | 120 |
| 5.2 Limitations de la méthode | 121 |
| 5.2.1 Le recul du noyau et le système de datation dit « ouvert » | 123 |
| 5.2.2 Le système ouvert : modèle empirique | 127 |
| 5.3 Estimer le changement du niveau marin à partir des coraux tropicaux | 129 |
| 5.4 Autres échantillons géologiques datables par la méthode U/Th | 132 |
| 5.5 Conclusion | 133 |

| | |
|---|------------|
| 6 Stratigraphie magnétique du million au millier d'années | 137 |
| 6.1 L'établissement de l'échelle des polarités magnétiques | 141 |
| 6.1.1 Premières mesures couplées aimantation des roches volcaniques – datation K/Ar ; échelle de McDougall et Tarling et de Mankinen et Dalrymple pour le Plio-Pleistocène | 141 |
| 6.1.2 Stratigraphie magnétique dans les séries sédimentaires plio-pleistocène | 142 |
| 6.1.3 Les anomalies magnétiques en mer et l'échelle des polarités magnétiques de Heirtzler | 144 |
| 6.1.4 L'échelle de Cande et Kent | 146 |
| 6.1.5 La calibration astronomique de l'échelle des polarités . | 147 |
| 6.1.6 Principe et pratique de la magnétostratigraphie | 149 |
| 6.1.7 Une étude magnétostratigraphique exemplaire : les séquences Siwalik au Pakistan | 150 |
| 6.2 Les excursions géomagnétiques et l'échelle des instabilités magnétiques (GITS) | 152 |
| 6.2.1 Découverte des excursions géomagnétiques | 152 |
| 6.2.2 Une échelle des instabilités géomagnétiques ? | 153 |
| 6.3 Stratigraphie magnétique basée sur les variations de l'intensité du champ géomagnétique | 155 |
| 6.3.1 Introduction | 155 |
| 6.3.2 Une corrélation sédiment-glaces polaires | 158 |
| 6.3.3 Implications paléo-océanographiques des corrélations magnétiques longue distance à haute résolution | 160 |
| 6.4 Conclusions | 164 |
| 7 La dendrochronologie | 169 |
| 7.1 Un peu de botanique et d'écologie | 170 |
| 7.2 L'interdatation | 171 |
| 7.3 Extension temporelle et spatiale | 174 |
| 7.4 Contribution à la calibration du ^{14}C | 175 |
| 8 La datation des archives glaciaires | 181 |
| 8.1 Différence âge gaz-âge glace | 182 |
| 8.1.1 Introduction | 182 |
| 8.1.2 Modélisation de la densification du névé | 184 |
| 8.1.3 Utilisation des isotopes ^{15}N et ^{40}Ar des bulles | 185 |
| 8.1.4 Synchronisation de deux forages | 186 |
| 8.2 Le comptage des couches annuelles | 187 |
| 8.3 La reconnaissance d'horizons datés | 189 |
| 8.3.1 Les horizons volcaniques | 189 |
| 8.3.2 Les événements de Dansgaard-Oeschger | 191 |
| 8.3.3 Les variations du champ magnétique et de l'activité solaire | 192 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 8.4 | Calage orbital et indicateurs de l'insolation locale | 194 |
| 8.5 | La modélisation de l'écoulement | 195 |
| 8.5.1 | Évaluation de l'accumulation de surface | 196 |
| 8.5.2 | Modèles d'écoulement de la glace | 196 |
| 8.5.3 | Les limites de la modélisation | 197 |
| 8.6 | La méthode inverse : une approche fédérative | 198 |
| 8.7 | Conclusion | 201 |
| 9 | Comment reconstituer la physique et la circulation de l'atmosphère ? | 205 |
| 9.1 | Interprétation des enregistrements, limites et incertitudes | 208 |
| 9.1.1 | Les incertitudes de l'échelle temporelle | 209 |
| 9.1.2 | Les incertitudes liées aux indicateurs géochimiques : le cas particulier de la composition isotopique des précipitations | 211 |
| 9.1.3 | Les incertitudes liées aux indicateurs biologiques | 214 |
| 10 | Interface air-glace : les glaces polaires | 219 |
| 10.1 | Indices de fusion et température du trou de forage | 220 |
| 10.2 | Isotopes stables de l'eau et température | 220 |
| 10.3 | Isotopes stables de l'air et température | 225 |
| 10.4 | Conclusions | 226 |
| 11 | Interface air-végétation : le pollen | 229 |
| 11.1 | De la production pollinique au sédiment | 229 |
| 11.2 | Le diagramme pollinique | 230 |
| 11.3 | La reconstruction du climat | 232 |
| 12 | Interface air-sol : les séquences loessiques, marqueurs de la circulation atmosphérique | 237 |
| 12.1 | Présentation des loess | 237 |
| 12.2 | Les loess comme source d'indicateurs paléoclimatiques | 238 |
| 12.2.1 | Les indicateurs sédimentologiques | 238 |
| 12.2.2 | Les indicateurs géochimiques | 241 |
| 12.2.3 | Les indicateurs géophysiques | 243 |
| 12.2.4 | Les indicateurs biologiques | 243 |
| 12.3 | Un exemple européen : la séquence de Nussloch dans la vallée du Rhin | 245 |
| 13 | Interface air-sol : reconstitution des paléoclimats avec les spéléothèmes | 249 |
| 13.1 | Les spéléothèmes : description, répartition, formation et préservation | 249 |
| 13.2 | Croissance et chronologie des spéléothèmes | 250 |
| 13.3 | Reconstruction paléoclimatique : approche qualitative | 252 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 13.4 | Reconstruction paléoclimatique : approche quantitative | 255 |
| 13.5 | Conclusion | 258 |
| 14 | Interface air-lac : les ostracodes des lacs tempérés | 261 |
| 14.1 | Principe | 261 |
| 14.2 | Transfert de la signature isotopique des précipitations vers les lacs | 262 |
| 14.3 | Les effets isotopiques lacustres | 263 |
| 14.4 | Étude hydrologique des lacs et choix des lacs | 263 |
| 14.5 | La composition isotopique des carbonates lacustres | 265 |
| 14.6 | Exemple de résultat : comparaison lac Ammersee / Groenland | 266 |
| 15 | Interface végétation-atmosphère : les cernes d'arbre | 269 |
| 15.1 | L'approche dendroclimatique | 269 |
| 15.2 | L'analyse dendro-isotopique | 273 |
| 16 | Interface air-végétation : un exemple d'utilisation de données historiques sur les vendanges | 281 |
| 16.1 | Les séries historiques de dates de vendanges | 282 |
| 16.2 | Reconstruction des températures printanier-estivales à partir des dates de vendanges | 282 |
| 16.3 | Limites de ces reconstructions : les effets anthropiques | 285 |
| 17 | Interface air-sols : les traceurs sédimentologiques des lacs tropicaux | 287 |
| 17.1 | Variabilité hydrologique intertropicale en Afrique | 288 |
| 17.2 | Sahara, Kalahari et zone arides : des preuves discontinues d'inversions hydrologiques | 288 |
| 17.3 | Zone (sub-)équatoriale : changements d'activité et de position de la ZCIT | 290 |
| 17.4 | L'anthropisation récente des archives climatiques : une preuve et un outil pour évaluer les impacts du développement local et régional | 291 |
| 18 | Interface air-eau : les diatomées des lacs tropicaux et la modélisation hydrologique | 295 |
| 18.1 | Sélection du site et collection du matériel | 296 |
| 18.2 | Reconstruction des conditions paléohydrologiques | 298 |
| 18.3 | Interprétation climatique et estimation des paléoprecipitations | 300 |
| 19 | Interface air-glace : les glaciers tropicaux | 305 |
| 19.1 | Les marqueurs paléoclimatiques | 306 |
| 19.2 | Quelques résultats importants de l'interprétation des enregistrements isotopiques andins | 307 |

| | |
|--|------------|
| 20 L'évolution de l'océan et du climat, les données de la paléocéanographie | 313 |
| 20.1 Introduction : le développement des outils et des concepts | 313 |
| 20.2 Température de l'eau de surface | 317 |
| 20.2.1 Distribution des faunes et flores marines | 318 |
| 20.2.2 Méthodes géochimiques | 321 |
| 20.2.2.1 Traceurs organiques | 321 |
| 20.2.2.2 Traceurs chimiques | 322 |
| 20.2.2.3 Traceurs isotopiques | 323 |
| 20.3 Salinité et densité de l'eau de surface | 325 |
| 20.3.1 Stratégie pour estimer la salinité dans le passé | 326 |
| 20.3.2 L'estimation de la température à laquelle les foraminifères sécrètent leur coquille | 327 |
| 20.3.3 Détermination de la composition isotopique de l'eau où les foraminifères ont vécu | 328 |
| 20.3.4 Passer des paléo-compositions isotopiques de l'eau aux paléosalinités | 330 |
| 20.3.4.1 Causes des variations passées de la salinité | 330 |
| 20.3.4.2 Calcul pratique des paléosalinités | 331 |
| 20.3.4.3 Estimation de l'erreur sur l'estimation | 331 |
| 20.3.5 Un exemple en Atlantique Nord pour le dernier maximum glaciaire | 332 |
| 20.4 Reconstitution de l'hydrologie de l'océan profond | 332 |
| 20.4.1 Les grands traits de la circulation actuelle | 332 |
| 20.4.2 Reconstituer les températures et les salinités des eaux profondes | 334 |
| 20.4.2.1 Rechercher comme référence une zone dont la température n'a pas varié | 335 |
| 20.4.2.2 Estimer la température indépendamment de la formule des paléotempératures | 336 |
| 20.4.2.3 Rechercher la signature géochimique des eaux anciennes dans les eaux interstitielles | 336 |
| 20.4.2.4 Mettre en évidence des gradients forts séparant deux masses d'eau | 336 |
| 20.4.3 Reconstituer la circulation des eaux profondes | 337 |
| 20.4.3.1 Reconstituer les lignes de courant à partir du $\delta^{13}\text{C}$ des foraminifères benthiques | 337 |
| 20.4.3.2 Utiliser les éléments trace des foraminifères benthiques | 338 |
| 20.4.3.3 Reconstituer la dynamique des masses d'eau | 340 |
| 20.5 Les grands domaines de la paléocéanographie | 341 |
| 20.5.1 De « l'âge de l'effet de serre » aux « âges de glace » | 342 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 20.5.2 | La « Révolution du Pleistocène moyen » et la mise en place des cycles de 100 ka | 344 |
| 20.5.3 | Le dernier maximum glaciaire | 345 |
| 20.5.4 | La dernière déglaciation | 347 |
| 20.5.5 | Les périodes interglaciaires, l'Holocène et le dernier millénaire | 350 |
| 20.5.5.1 | L'interglaciaire marin 5.5 ou Éemien | 350 |
| 20.5.5.2 | L'Holocène | 352 |

Avant-propos

Avant de partir dans ce voyage dans les paléoclimats de la Terre, il convient de savoir à quoi nous allons être confrontés. Cette exploration va nous conduire au sein du « système Terre » : un enchevêtrement imbriqué de composantes dont les caractéristiques et les temps de réponse peuvent être très différents, un système en interaction permanente que nous allons disséquer dans la première partie de cet ouvrage, afin que le lecteur parte équipé d'un « kit climatique » avant de se plonger dans l'étude des paléoclimats. Ce rapide survol montre la très grande diversité des systèmes en présence. Entre la physique des nuages qu'on peut voir évoluer de minutes en minutes au-dessus de nos têtes et celle des calottes glaciaires qui mettent près de 100 000 ans à atteindre leur apogée, les écarts temporels sont vertigineux. Mais l'hétérogénéité des dimensions spatiales l'est également : des processus à des échelles millimétriques pour la condensation des gouttes d'eau impliquées dans la formation des nuages aux immenses calottes de glace de 3 000 m de hauteur, qui enfoncent leur socle rocheux sur près de 1 000 m, l'écart spatial est aussi impressionnant. Pourtant il s'agit bien du même système Terre qui va au cours des âges subir différentes perturbations que nous allons discuter.

L'étude des paléoclimats implique très fortement la maîtrise de deux notions indispensables pour commencer à décrire les climats passés de la Terre.

La première est tellement évidente qu'on n'y pense pas *a priori*, et pourtant, c'est la plus importante pour se repérer et établir des liens de causalité. C'est la notion de temps. Être en mesure de bien se repérer dans le temps face à des enregistrements paléoclimatiques de natures variées est essentiel. En effet, la mesure du temps est à la base de nos recherches. Celle qu'on utilise tous les jours ne nous est utile que sur les derniers siècles. Au-delà, il va falloir utiliser d'autres « montres », d'autres marqueurs du temps. La seconde partie de cet ouvrage est entièrement consacrée à cette question. Différents techniques doivent être mises en œuvre pour les différentes échelles de temps envisagées dans le chapitre 2. Ainsi le carbone-14 (chapitre 3) est-il capable de fournir des mesures fiables jusqu'à 30 à 40 000 ans ? Il faudra utiliser d'autres déséquilibres radioactifs (chapitres 4 et 5) pour accéder à des échelles de temps plus longues. Mais il n'y a pas que des méthodes basées sur la radioactivité qui permettent de révéler l'âge des sédiments ; l'utilisation du magnétisme (chapitre 6) s'avère également une méthode puissante pour reconnaître des

via le courant nord islandais et une augmentation de l'export de glace de mer et donc d'eau douce par les mers nordiques. Ces tendances ont été confirmées par l'analyse de quelques carottes prélevées en Atlantique Nord. Toutefois, ces quelques études ponctuelles ne sont que le point de départ des études nécessaires pour bien documenter les variations de l'océan au cours des derniers millénaires.

Références bibliographiques

- [1] Adkins, J. F., McIntyre, K. et Schrag, D. P. (2002). « The Salinity, Temperature and $\delta^{18}\text{O}$ of the Glacial Deep Ocean », *Science*, 298, pp. 1769-1773.
- [2] CLIMAP (1981) « Seasonal Reconstructions of the Earth's Surface at the Last Glacial Maximum », *Geol. Soc. Am. Map and Chart Ser.*, MC-36.
- [3] Curry, W. B. et Oppo, D. W. (2005) « Glacial Water Mass Geometry and the Distribution of $\delta^{13}\text{X}$ of $\sum\text{CO}_2$ in the Western Atlantic Ocean », *Paleoceanography*, 20, doi:10.1029/2004PA001021.
- [4] Duplessy, J. C., Labeyrie, L., Juillet-Leclerc, A., Maitre, F., Duprat, J. et Sarnthein, M. (1991), « Surface salinity reconstruction of the North Atlantic Ocean during the last glacial maximum », *Oceanologica Acta*, 14, pp. 311-324.
- [5] Duplessy, J. C., Roche, D. M. et Kageyama, M. (2007) « The Deep Ocean during the Last Interglacial Period », *Science*, 316, pp. 89-91.
- [6] Duplessy, J. C., Shackleton, N. J., Fairbanks, R. G., Labeyrie, L., Oppo, D. et Kallel, N. (1988), « Deepwater Source Variations During the last Climatic Cycle and their Impact on the Global Deepwater Circulation », *Paleoceanography*, 3, pp. 343-360.
- [7] Elderfield, H. et Ganssen, G. (2000), « Past Temperature and d^{18}O of Surface Ocean Waters Inferred from Foraminiferal Mg/Ca Ratios », *Nature*, 405, pp. 442-445.
- [8] Emiliani, C. (1955), « Pleistocene temperatures », *Journal of Geology*, 63, 538-578.
- [9] Gherardi, J. M., Labeyrie, L., Nave, S., Francois, R., McManus, J. F. et Cortijo, E. (2009) « Glacial-Interglacial Circulation Changes Inferred from $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ Sedimentary Record in the North Atlantic Region », *Paleoceanography*, 24, PA2204, doi:10.1029/2008PA001696.
- [10] Ghosh, P., Adkins, J., Affek, H., Balta, B., Guo, W., Schauble, E. A., Schrag, D. P. et Eiler, J. M. (2006), « ^{13}C - ^{18}O Bonds in Carbonate Minerals: a New Kind of Paleothermometer », *Geochim. Cosmochim. Acta*, 70, pp. 1439-1456.
- [11] Guihou, A., Pichat, S., Nave, S., Govin, A., Labeyrie, L., Michel, E. et Waelbroeck, C. (2010) « Late Slowdown of the Atlantic Meridional Overturning Circulation during the Last Glacial Inception: New Constraints

From Sedimentary ($^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$) », *Earth and Planetary Science letters*, 289, pp. 520-529.

- [12] Imbrie, J. et Kipp, N. G. (1971), « A New Micropaleontological Method for Quantitative Paleoclimatology: Application to a late Pleistocene Caribbean Core », dans Turekian, K. K. (Ed.), *The late Cenozoic glacial ages*, Yale University Press, pp. 71-181.
- [13] Jansen, E. et Sjoholm, J. (1991) « Reconstruction of Glaciation over the 6 Myr from Ice-Borne Deposits in the Norwegian Sea », *Nature*, 349, pp. 600-603.
- [14] Kallel, N., Labeyrie, L. D., Juillet-Leclerc, A. et Duplessy, J. C. (1988) « A Deep Hydrological Front Between Intermediate and Deep-Water Masses in the Glacial Indian Ocean », *Nature*, 333, pp. 651-655.
- [15] Kallel, N., Paterne, M., Duplessy, J. C., Vergnaud-Grazzini, C., Pujol, C., Labeyrie, L., Arnold, M., Fontugne, M. et Pierre, C. (1997) « Enhanced Rainfall in the Mediterranean Region During the Last Sapropel Event », *Oceanologica Acta*, 20, pp. 697-712.
- [16] Koç, N., Jansen, E. et Haflidason, H. (1993) « Paleoceanographic Reconstructions of Surface Ocean Conditions in the Greenland, Iceland and Norwegian Seas through the Last 14 Ka Based on Diatoms », *Quaternary Science Reviews*, 12, pp. 115-140.
- [17] Labeyrie, L., Duplessy, J. C., Duprat, J., Juillet-Leclerc, A., Moyes, J., Michel, E., Kallel, N., and Shackleton, N. J. (1992) « Changes in Vertical Structure of the North Atlantic Ocean between Glacial and Modern Times », *Quaternary Science Reviews*, 11, pp. 401-413.
- [18] Labeyrie, L. D., Duplessy, J. C. et Blanc, P. L. (1987) « Variations in Mode of Formation and Temperature of Oceanic Deep Waters over the Past 125 000 Years », *Nature*, 327, pp. 477-482.
- [19] Liesecki, L. E. et Raymo, M. E. (2005), « A Pleiocene-Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed $d^{18}\text{O}$ Records », *Paleoceanography*, 20, doi:10.1029/2004PA001071.
- [20] Lynch-Stieglitz, J., Curry, W. B. et Slowey, N. (1999) « A Geostrophic Transport Estimate for the Florida Current from the Oxygen Isotope Composition of Benthic Foraminifera », *Paleoceanography*, 14, pp. 360-373.
- [21] Malmgren, B. A., Kucera, M., Nyberg, J. et Waelbroeck, C. (2001), « Comparison of Statistical and Artificial Neuronal Network Techniques for Estimating Past Sea Surface Temperatures from Planktonic Foraminifer Census Data », *Paleoceanography*, 16, pp. 520-530.
- [22] MARGO Project Members (2009) « Constraints on the Magnitude and Patterns of Ocean Cooling at the Last Glacial Maximum », *Nature geoscience*, DOI: 10.1038/NGEO411.
- [23] Prahl, F. G. et Wakeham, S. G. (1987), « Calibration of Unsaturation Patterns in Long-Chaine Ketone Compositions for Paleotemperature Assessment », *Nature*, 330, pp. 367-369.