

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	Traitement 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 printano-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 paléoprécipitations	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 Émien	350
20.5.5.2	L'Holocène	352