

Table des matières

Préface	iii
Avant-propos	xvii
Introduction	xix
1 Biogéochimie du système climatique au cours du dernier million d'années	1
1.1 Introduction	1
1.1.1 La composition de l'atmosphère influence le bilan énergétique de la Terre et la dynamique du climat	1
1.1.2 Composition de l'atmosphère et variables climatiques ont été largement corrélées dans le passé	3
1.1.3 Les processus déterminant la composition de l'atmosphère	4
1.2 Reconstitution de la composition de l'atmosphère et de la productivité des biosphères marine et continentale au Quaternaire	5
1.2.1 Les archives glaciaires permettent de reconstituer la composition de l'atmosphère au cours des derniers 800 ka	5
1.2.1.1 Une succession de forages a permis de remonter dans le temps (Fig. 1.2)	5
1.2.1.2 Les principes de l'enregistrement dans la glace	7
1.2.1.3 Les résultats récents du forage EPICA	11
1.2.2 Les archives sédimentaires permettent de reconstituer les productivités biologiques (marine et terrestre) et les dépôts de poussières	15
1.2.2.1 Productivité marine	16
1.2.2.2 Productivité terrestre	19
1.2.2.3 L'aérosol désertique	22
1.3 Explications : les interactions climat-biogéochimie	23
1.3.1 Cycle du CO ₂	23
1.3.1.1 La quête du graal des paléoclimatologues : les 80 ppmv!	24

1.3.1.2	Le phasage dans le temps des différents mécanismes permet en partie de contraindre le système	28
1.3.1.3	À plus courte échelle de temps, des variations rapides du CO ₂ atmosphérique	30
1.3.2	Cycle du méthane	30
1.3.3	Cycle de l'azote	33
1.3.3.1	Au cours du Quaternaire, N ₂ O varie en phase avec CH ₄ et CO ₂	33
1.3.3.2	L'azote comme élément nutritif limitant la productivité marine	35
1.3.4	Cycle du soufre	36
1.3.5	L'aérosol désertique	38
1.3.6	Le sel de mer	40
2	Cryosphère et niveau marin	47
2.1	Introduction	47
2.1.1	Qu'est-ce qu'une calotte glaciaire ? Quelques définitions de termes glaciologiques	48
2.1.2	De quoi dépend le niveau des mers ?	51
2.2	Mécanismes en jeu dans l'évolution d'une calotte	56
2.3	Reconstructions du niveau des mers et des calottes du passé	63
2.3.1	Les données qui permettent de reconstruire la géographie des calottes passées	63
2.3.2	Les derniers 50 millions d'années	67
2.3.3	Les trois derniers millions d'années	67
2.3.4	Scénario du dernier cycle glaciaire-interglaciaire	69
2.3.4.1	Le Laurentide	69
2.3.4.2	La Fennoscandie	71
2.3.4.3	L'Antarctique	72
2.3.4.4	Le Groenland	75
2.4	Conclusions	76
3	L'évolution des climats à l'échelle des temps géologiques	79
3.1	L'évolution des climats depuis 4,56 milliards d'années	81
3.2	Les reconstructions paléogéographiques	87
3.2.1	La valse des continents	87
3.2.2	L'outil paléomagnétique, les tests et les incertitudes	93
3.2.3	La topographie des continents	95
3.2.3.1	À partir de la flore	97
3.2.3.2	À partir des sédiments érodés	98
3.2.3.3	À partir de mesures isotopiques	98
3.2.4	Les variations eustatiques et les passages maritimes	101
3.2.5	Un survol des visages de la Terre à travers les âges	106

3.3	Impact des changements paléogéographiques sur l'évolution climatique	118
3.3.1	La dérive des continents	118
3.3.2	Changements paléogéographiques et circulation océanique	120
3.3.3	La fermeture des passages maritimes	123
3.3.4	L'influence des mers épicontinentales	124
3.3.5	Impact des mouvements verticaux de la croûte sur le climat	127
3.3.6	Tectonique, climat et érosion	131
3.3.7	Les effets indirects des changements paléogéographiques	133
3.4	Conclusion	135

La modélisation en paléoclimatologie **139**

4.1	Pourquoi construire des modèles en paléoclimatologie?	139
4.2	Quelques notions de base en modélisation	142
4.2.1	Vocabulaire	142
4.2.2	Systèmes dynamiques	144
4.2.3	Climat et déterminisme	147
4.3	Les contours d'un modèle de climat	148
4.3.1	Choix d'un sous-ensemble du système climatique : modèle et conditions aux limites	148
4.3.2	Couplages entre plusieurs composantes	148
4.3.3	Comparaison aux données paléoclimatiques	149
4.4	Modèles de circulation générale, modèles complexes du système Terre	151
4.4.1	Équations, discrétisation et paramétrisations : exemple des modèles de circulation générale atmosphérique	151
4.4.2	Vers un modèle « intégré » du système Terre	157
4.4.3	Modélisation « réaliste » des paléoclimats	159
4.4.3.1	Conditions aux limites conditions initiales	159
4.4.3.2	Exercices de comparaison des modèles	161
4.4.3.3	Comparaison aux reconstructions paléoclimatiques	163
4.4.4	Expériences de sensibilité	165
4.4.5	Perspectives	168
4.5	Modèles du système Terre de complexité intermédiaire (EMICS) 169	
4.5.1	Principes de base et historique	169
4.5.2	Exemples de simulations longues et d'étude de sensibilité aux forçages	170
4.5.3	Exemple d'utilisation de modèles de complexité intermédiaire pour l'exploration d'une multitude de forçages ou de paramètres : exploration d'un « espace des phases »	172

4.5.4	Perspectives	173
4.6	Modèles conceptuels	173
4.6.1	Le modèle de Budyko/Sellers	174
4.6.2	Le modèle de Stommel (1961)	176
4.6.3	Le modèle de Welander	178
4.7	Conclusions et perspectives	180
5	Le climat au Précambrien	185
5.1	Les indicateurs climatiques	186
5.2	La théorie du paléothermostat	188
5.3	Les grands événements climatiques du Précambrien	193
5.3.1	De 4,5 à 2,4 Ga	193
5.3.2	Le grand événement d'oxydation (GEO)	194
5.3.3	Le Protérozoïque	197
5.3.4	La fin du Protérozoïque : les glaciations globales	198
5.3.5	L'entrée en glaciation	200
5.3.6	Pendant la glaciation	203
5.3.7	La sortie de glaciation	204
5.4	Conclusion	207
6	Les climats du Phanérozoïque	211
6.1	Les <i>proxies</i> du climat Phanérozoïque	212
6.1.1	Indicateurs sédimentologiques	212
6.1.2	Indicateurs isotopiques	212
6.1.2.1	Le $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates	212
6.1.2.2	Le $\delta^{18}\text{O}$ des phosphates	216
6.1.2.3	La méthode isotopique carbonate « clumped » ou méthode du (Δ_{47})	217
6.1.3	Les indicateurs isotopiques indirects	218
6.1.3.1	Le $\delta^{13}\text{C}$ des sédiments carbonatés	218
6.1.3.2	Le rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des sédiments carbonatés	221
6.1.4	Le niveau de CO_2 atmosphérique	223
6.2	Les grands modes climatiques du Phanérozoïque et leurs causes possibles	226
6.2.1	Les causes des modes climatiques froids	227
6.2.2	Les causes des modes climatiques chauds	229
6.2.3	Le paléothermostat terrestre au Phanérozoïque	230
6.3	Le climat du Paléozoïque : chronologie des grandes tendances et leurs causes	232
6.3.1	La glaciation fin-Ordovicien	232
6.3.2	Le climat du Dévonien	234
6.3.3	La glaciation Permo-Carbonifère	235
6.3.4	La fin du Paléozoïque	236
6.3.5	Le Mésozoïque	237

6.3.6	Le Cénozoïque	241
6.4	Les événements climatiques courts du Phanérozoïque	245
6.4.1	La transition Callovien-Oxfordien (Jurassique moyen-Jurassique supérieur)	245
6.4.2	La limite Crétacé-Tertiaire, la météorite et les éruptions fissurales du Deccan	246
6.4.3	Le maximum thermique de la transition Paléocène-Eocène (PETM)	251
6.5	Conclusions	251
7	Climat et cycles astronomiques	257
7.1	Un peu d'histoire	257
7.1.1	De la découverte des glaciations aux premières théories du climat	257
7.1.2	De Adhémar à Milankovitch : le rôle de l'insolation	259
7.1.3	De Tyndall à Arrhénius : le rôle du gaz carbonique	260
7.2	Paramètres astronomiques et insolation	261
7.2.1	Excentricité	261
7.2.2	Obliquité	263
7.2.3	Précession des équinoxes et précession climatique	265
7.2.4	Calculs d'insolation, problème du calendrier	267
7.2.5	Quel forçage astronomique pour le climat ?	269
7.3	Les succès et les difficultés de la théorie de Milankovitch	270
7.3.1	De l'hypothèse à la preuve	270
7.3.2	Un système quasi-linéaire pour la précession et l'obliquité	271
7.3.3	Le problème des cycles de 100 000 ans	273
7.3.4	Quelques modèles simples	274
7.4	Les progrès récents	278
7.4.1	Le rôle essentiel du CO ₂ atmosphérique	278
7.4.2	Vers une synthèse des théories astronomique et géochimique ?	280
7.5	Les cycles astronomiques pré-Quaternaire	281
7.6	Conclusions	288
8	Variabilité climatique rapide : description et mécanismes	293
8.1	Des changements climatiques rapides en période glaciaire : événements de Heinrich et de Dansgaard-Oeschger	294
8.1.1	La découverte	294
8.1.2	Les conséquences régionales des événements de Heinrich et de Dansgaard-Oeschger : Atlantique Nord et régions adjacentes	297
8.1.2.1	Océan Atlantique	297
8.1.2.2	Continents adjacents	299
8.1.3	Variabilité millénaire en d'autres régions du globe	301

8.1.4	Mécanismes	302
8.1.4.1	Événements de Heinrich	303
8.1.4.2	Cycles de Dansgaard-Oeschger	312
8.2	Des événements abrupts pendant les périodes interglaciaires	313
8.2.1	La découverte	313
8.2.2	Les observations	313
8.2.3	Les mécanismes	314
8.2.4	La modélisation et les conséquences hémisphériques/globales	315
8.3	Perspectives	317
8.3.1	Connexions globales	317
8.3.2	Interactions événements rapides – grandes transitions climatiques	318
9	Holocène et perturbation anthropique : introduction	325
9.1	Les grandes tendances de l'Holocène	325
9.1.1	Les différentes perturbations radiatives	325
9.1.1.1	L'évolution des températures dans les différents enregistrements	328
9.2	Événements marquants de l'Holocène	330
9.2.1	La fin de la période humide en Afrique	331
9.2.2	Optimum climatique médiéval	331
9.2.3	Le Petit Âge de glace	332
9.2.4	L'Anthropocène	333
9.3	Reconstructions du climat pour l'Holocène	334
9.3.1	Les différentes archives	334
9.3.1.1	Les archives des sociétés	334
9.3.1.2	Les indicateurs indirects	335
9.3.1.3	Les indicateurs directs	336
9.3.2	Les méthodes statistiques pour les reconstructions climatiques	337
9.4	Simulations du climat	339
9.4.1	Simulations de l'Holocène	339
9.4.1.1	Les grandes tendances	339
9.4.1.2	Quelques périodes de référence et l'analyse des rétroactions	340
9.4.1.3	Rétroactions liées à la neige, à la végétation et à la glace de mer dans les hautes latitudes	341
9.4.2	La mousson et les rétroactions de l'océan et de la végétation	342
9.4.2.1	Le rôle de l'océan	344
9.4.2.2	Le rôle de la végétation	346
9.4.2.3	La végétation et la fin de la période humide en Afrique	348

9.4.3	Le climat récent (derniers siècles)	349
9.5	Caractères de la variabilité climatique	350
9.5.1	La circulation des extra-tropiques	350
9.5.2	Le Pacifique équatorial (ENSO)	353
9.5.3	Les extrêmes climatiques par rapport à la moyenne . . .	356
9.6	Questions ouvertes à l'aube du xxi ^e siècle	358
9.6.1	Météo ou climat	358
9.6.2	Détection et attribution du changement climatique . . .	358
10	Des climats du passé aux climats du futur	363
10.1	Observations du climat des dernières décennies :	
	premiers indices d'un réchauffement	364
10.1.1	Évolution des gaz à effet de serre	365
10.1.2	Évolution de la température de surface	368
10.1.3	Évolution de la température dans la troposphère . . .	371
10.1.4	Précipitations et bilan hydrique	371
10.1.5	Les événements extrêmes	373
	10.1.5.1 Extrêmes de température	374
	10.1.5.2 Extrêmes de précipitation	375
10.1.6	Évolution de la cryosphère	375
	10.1.6.1 La couverture neigeuse	376
	10.1.6.2 Évolution de la banquise	377
	10.1.6.3 Le pergélisol	380
	10.1.6.4 Les glaciers	381
	10.1.6.5 Les calottes polaires	382
10.1.7	Évolution du niveau marin	387
10.2	Modélisation climatique et changements récents	390
10.2.1	Les modèles climatiques radiatifs simples et leurs limites	390
10.2.2	Les modèles de circulation générale :	
	progrès et limites	391
	10.2.2.1 L'évolution des modèles climatiques	391
	10.2.2.2 Quelles sont les incertitudes propres aux modèles de climat ?	393
10.2.3	Simulation du climat actuel et des évolutions récentes	394
	10.2.3.1 Climat moyen	394
	10.2.3.2 Variabilité du climat	396
	10.2.3.3 Évolution récente du climat	398
10.3	Prévoir le devenir du système climatique	399
10.3.1	Réponse climatique à un doublement de CO ₂ :	
	forçage et rétroactions	399
10.3.2	Les scénarios d'évolution des forçages	404
10.3.3	Le cycle du CO ₂	405
10.4	Les prévisions climatiques en 2100	407

10.4.1	Ce que disent les modèles : principales caractéristiques climatiques	407
10.4.1.1	Amplitude du réchauffement	407
10.4.1.2	Distribution géographique des changements de température	407
10.4.1.3	Évolution des précipitations	410
10.4.1.4	Évolution des tempêtes	411
10.4.1.5	Évolution de la glace de mer	412
10.4.1.6	Évolution de la glace continentale	412
10.4.1.7	Le niveau des mers	415
10.4.1.8	Expansion thermique	417
10.4.1.9	Variations locales liées aux variations de densité de l'océan et aux changements de dynamique	418
10.4.1.10	Variations liées à la glace continentale	419
10.5	Le climat des prochains millénaires : vers une modélisation intégrée du système Terre	420
10.5.1	Évolution climatique : la perturbation anthropique <i>vs.</i> les variations d'insolation	420
10.5.2	Le devenir lointain des calottes polaires : impact et irréversibilité	422