

# Table des matières

Préface	iii
Avant-propos	xvii
Introduction	xix
<b>1 Biogéochimie du système climatique au cours du dernier million d'années</b>	<b>1</b>
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 <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> O varie en phase avec CH <sub>4</sub> et CO <sub>2</sub> . . . . .	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
<b>2</b>	<b>Cryosphère et niveau marin</b>	<b>47</b>
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
<b>3</b>	<b>L'évolution des climats à l'échelle des temps géologiques</b>	<b>79</b>
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
<b>4</b>	<b>La modélisation en paléoclimatologie</b>	<b>139</b>
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
<b>5</b>	<b>Le climat au Précambrien</b>	<b>185</b>
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
<b>6</b>	<b>Les climats du Phanérozoïque</b>	<b>211</b>
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 ( $\Delta_{47}$ ) . . . . .	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 $\text{CO}_2$ 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
<b>7</b>	<b>Climat et cycles astronomiques</b>	<b>257</b>
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 <sub>2</sub> 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
<b>8</b>	<b>Variabilité climatique rapide : description et mécanismes</b>	<b>293</b>
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
<b>9</b>	<b>Holocène et perturbation anthropique : introduction</b>	<b>325</b>
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 <sup>e</sup> siècle . . . . .	358
9.6.1	Météo ou climat . . . . .	358
9.6.2	Détection et attribution du changement climatique . . .	358
<b>10</b>	<b>Des climats du passé aux climats du futur</b>	<b>363</b>
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 <sub>2</sub> :	
	forçage et rétroactions . . . . .	399
10.3.2	Les scénarios d'évolution des forçages . . . . .	404
10.3.3	Le cycle du CO <sub>2</sub> . . . . .	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