

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 |
| 4 | 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 |